

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CALIBRACIÓN PARA MEDICIONES
DE CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y
EVALUACIÓN DE SU USO INDUSTRIAL**

JORGE EDUARDO TAPIA FARIAS

Profesor guía. Dr. Ignacio Olivares Bahamondes

Trabajo de graduación presentado a la Facultad de Ciencia,
en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar
al grado de Ingeniero Físico

Santiago- Chile
2011

**CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CALIBRACIÓN PARA MEDICIONES
DE CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y
EVALUACIÓN DE SU USO INDUSTRIAL**

Por
JORGE EDUARDO TAPIA FARIAS

Éste trabajo de graduación fue preparado bajo la supervisión del profesor guía Ignacio Olivares Bahamondes, del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora.

Dr. Ignacio Olivares Bahamondes

Dr. Carlos Balocchi Carreño

Dr. Ernesto Gramsh Labra

Dr. Jorge Ferrer Meli

.....
Bernardo Carrasco Puentes
Director Departamento de Física

.....
Roberto Bernal Valenzuela
Jefe de Carrera Ingeniería Física

AGRADECIMIENTOS

Es de importancia para mi agradecer dentro del contexto de este trabajo, el apoyo fundamental de mi núcleo familiar completo, mis padres Ana y Jorge, mi hermana María Ignacia y mis sobrinas Paz y Matilda, pues siempre he contado con su apoyo, y como familia, son la protección y el descanso en momentos de arduo trabajo.

Sin desmedro de lo anterior, agradezco el apoyo de personas como Don Nelson y Don Manuel, mecánicos de precisión del departamento de física de la universidad, pues me extendieron su ayuda, experiencia y conocimiento técnico sin esperar nada a cambio, por lo que los considero extraordinarias personas. Así también, fueron importante dentro del desarrollo de mi trabajo, el apoyo de mis compañeros del laboratorio de óptica, a los cuales les agradezco sus palabras de aliento y su aporte en conocimiento. Por último, agradezco al profesor Ignacio Olivares por darme el espacio y la confianza de trabajar dentro del grupo de óptica del departamento de física, pues ha sido una oportunidad que me ha otorgado muchas satisfacciones intelectuales.

DEDICATORIA

A mis padres Ana y Jorge

RESUMEN

El presente trabajo tiene por finalidad la puesta a punto y evaluación de una celda de calibración de un láser sintonizable para mediciones de concentración de contaminantes atmosféricos. Se puso a prueba una celda que permite producir vapores atómicos de litio neutro que sirve para calibrar láseres en la región del espectro visible donde es posible encontrar una serie de contaminantes atmosféricos de interés. Por lo anterior, los resultados de este trabajo muestran la absorción de un láser de diodo sintonizable comercial entorno a los 670 [nm] dentro de la celda construida. Además, se resaltan los aspectos críticos para obtener tales resultados en base a instrumentación construida y comercial. Por último, en este trabajo también es evaluada la factibilidad técnica del método y la posibilidad de su uso en la industria.

Tabla de contenido

Capítulo 1

Introducción.....	9
-------------------	---

Capítulo 2

Teoría.....	12
2.1 Litio y sus propiedades físicas.....	12
2.2 Diodos Láser.....	16
2.3 Uso de cavidades externas Littrow y Littman-Metcalf.....	19
2.4 Saltos de modos.....	19
2.5 Láser con cavidad Littrow.....	20
2.6 Láser con cavidad Littman-Metcalf.....	22
2.7 Interferómetro Fabry Perot confocal.....	25

Capítulo 3

Experimento.....	32
3.1 Diseño y fabricación de un interferómetro Fabry Perot confocal.....	34
3.2 Montura de primer espejo.....	35
3.3 Sistema piezoeléctrico-Espejo plano cóncavo.....	37
3.4 Montura de segundo espejo.....	38
3.5 Posicionamiento de estructuras y frontalidad de espejos.....	39
3.6 Cálculo de la Finesse y FSR del interferómetro confocal de construcción propia.....	47
3.7 Construcción de láser de diodo sintonizable con cavidad Littrow.....	47
3.8 Sellado de sistema láser.....	58
3.9 Determinación de la red de difracción para la cavidad Littrow y sus consecuencias.....	62

3.10 Sistema de protección de corriente para diodo láser y cuidados en su manejo.....	64
3.11 Control de temperatura y corriente para sistema láser de fabricación propia.....	66
3.12 Cálculo del aporte del movimiento traslacional y angular en el barrido en frecuencia dentro de la cavidad Littrow.....	67
3.13 Construcción de celda de litio para absorción en vapor de litio neutro.....	69
3.14 Diseño y Fabricación de abrazadera de ladrillos refractarios para calentamiento de la muestra Al-Li.....	74
3.15 Heat Pipe: Implementación y puesta en marcha.....	75
3.16 Evaluación de funcionamiento de interferómetros.....	79
3.17 Medición de potencia en láseres.....	81
3.18 Barrido con piezoeléctricos de disco delgado.....	81
3.19 Barrido con piezoeléctrico de disco C-5500.....	82
3.20 Barrido con piezoeléctrico interno de Láser 2010 EOSI.....	83
3.21 Absorción en vapor de litio neutro en Heat Pipe.....	84
 Capítulo 4	
Resultados.....	88
4.1 Umbral y potencia del Láser 2010 EOSI.....	88
4.2 Umbral y potencia de láser TOLD 9221M.....	89
4.3 Barrido de los láseres TOLD 9221M y láser 2010 EOSI.....	89
4.4 Barrido con piezoeléctrico de disco delgado.....	90
4.5 Barrido con piezoeléctrico de disco C-5500.....	91
4.6 Barrido con piezoeléctrico interno de Láser 2010 EOSI.....	92
4.7 Rendimiento de Fabry Perot confocal de construcción propia en laboratorio.....	93
4.8 Rendimiento de Fabry Perot confocal comercial FPI100 Toptica.....	95
4.9 Rendimiento de Fabry Perot confocal comercial Burleigh.....	97
4.10 Resultados de absorción conseguidos en celda de vapor de litio neutro.....	99

Capítulo 5	
Análisis de datos.....	104
5.1 Absorción en vapor de litio neutro.....	104
Capítulo 6	
Discusión.....	115
Capítulo 7	
Conclusión.....	116
Referencias.....	117
Índice de Figuras.....	119
Índice de Tablas.....	133

Capítulo 1

Introducción

Entre los métodos más usados de medición de contaminantes está la utilización de láseres. La luz láser es capaz de ser absorbida por vapores atómicos de distintas sustancias. Estos cuentan con determinadas características que hacen posible la absorción. La variable más relevante de un láser en un proceso de absorción es su frecuencia (ó longitud de onda). Dado cierto vapor, este tiene frecuencias de resonancia específicas, por lo que para que se absorba un haz de luz láser en éste, es necesario sintonizarlo a la frecuencia de resonancia de dicha sustancia. Una forma de sintonizar láseres en forma precisa, es utilizando fuentes de luz llamadas diodos láser, los cuales para sintonizarlos, se les extiende sus cavidades de resonancia internas en forma externa, como por ejemplo con configuración Littrow o Littman-Metcalf, para así, controlar las frecuencias en que la luz se esta emitiendo desde el diodo láser. Los láseres de diodo son buenas fuentes de luz láser pues ofrecen bandas angostas de funcionamiento (< 1 MHz), estabilidad de funcionamiento y son de bajo costo comercial pero tienen la dificultad de su funcionamiento modal, es decir, la estabilidad de su frecuencia varía con los cambios de retroalimentación, estos saltos de frecuencia son llamados *saltos de modo* (mode Hops) y deben ser analizados mediante un Interferómetro Fabry Perot para eliminar tal problema. Debido a que la absorción debe ser realizada en un vapor, este debe estar confinado dentro de una cámara de vacío ó sistema capaz de generarlo. Si se cuenta con un sistema de este tipo, entonces se debe poder generar el vapor dentro de él, el cual en este caso particular se obtiene desde la evaporación de una muestra de Litio posicionada dentro de la cámara. Para evaporarla, se debe aplicar calor mediante algún sistema que eleve la temperatura de la muestra dentro de la cámara. A todo el sistema anterior, cámara de vacío más sistema de calentamiento se le denomina horno. El litio comienza a evaporarse a una temperatura

de entre 250 [°C] y 300 [°C], por lo que cualquier sistema que se utilice debe contar con tal capacidad de elevar la temperatura de la muestra a ese nivel de temperatura. Existen dos tipos de configuraciones utilizadas en este trabajo que permiten tal situación. La primera es crear un horno con piezas comerciales que contenga la muestra sólida de aleación Aluminio-Litio (Al-Li). La elevación de la temperatura del sistema se desarrolla mediante dos mecanismos. La primera configuración (Fig.1), cuenta con una abrazadera formada por dos ladrillos a los cuales se le adosan dos ampolletas de haluro metálico capaces de entregar, cada una, potencias de 250 [W] y que es construido en el Laboratorio de Óptica de la Universidad y que se posiciona entorno a la zona donde se coloca la muestra. La segunda forma es mediante el enrollado de un alambre altamente resistivo de kanthal, al cual se le hace pasar corriente para que eleve su temperatura. El enrollado de alambre es cubierto con cerámica refractaria y posicionado alrededor de la zona del horno que contiene la muestra.

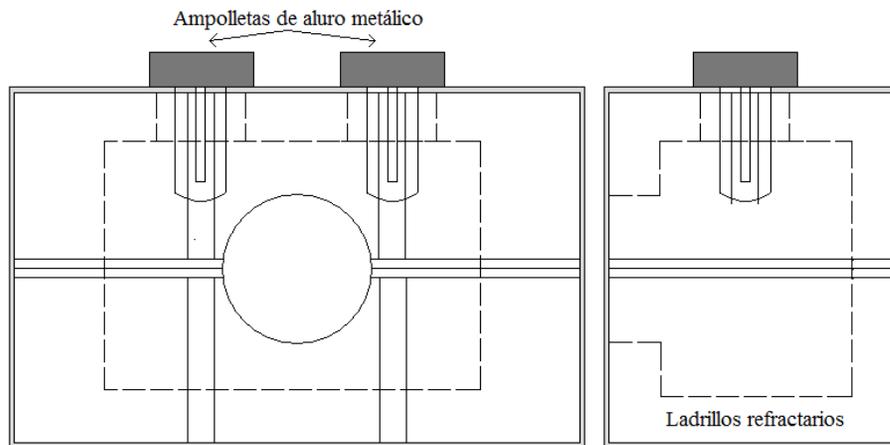


Figura 1. Primera configuración de mecanismo para elevar temperatura de muestra de Al-Li

Un segundo sistema de vacío se pone en marcha para evaporar litio, el llamado Heat Pipe, que es Comercial. Un Heat Pipe es una sistema conformado por un tubo principal que cuenta con dos ventanas que soportan altas temperaturas (hasta 450 [°C]). Este tubo esta cubierto con un material cerámico refractario que contiene un alambre de alta

resistencia eléctrica que es alimentado y controlado por una fuente de corriente, por lo que es posible, elevar la temperatura en una zona específica. Además, el Heat Pipe es capaz de mantener el vapor generado dentro de él, confinado en una zona determinada de su estructura puesto que en sus extremos posee un sistema de enfriamiento que evita que el vapor de litio, a alta temperatura, se siga expandiendo hasta las ventanas. Para tal situación, es necesario mantener un gas de fondo ó buffer en el sistema, por ejemplo, helio ó argón. Para el correcto funcionamiento de un Heat Pipe es necesario crear un circuito de tubos y llaves capaces de sellar el sistema luego de hacer vacío e introducir el gas buffer en él. Dado lo anterior, se hizo una elección de que horno funciona de la mejor forma para la evaporación del litio de tal manera que el sistema sea utilizado como una celda de calibración para sintonizar un láser.

Capítulo 2

Teoría

2.1 Litio y sus propiedades físicas

El litio en su forma sólida, es el más ligero de los metales y presenta una apariencia gris plateada. Como todos los alcalinos, este reacciona con el agua, pero no tan violentamente como el sodio. El litio aparece naturalmente en dos isótopos, ${}^7\text{Li}$ con cuatro neutrones y ${}^6\text{Li}$ con tres. Sin embargo, los dos isótopos difieren por una única partícula de spin $1/2$. Estos exhiben diferentes estadística cuántica. El ${}^7\text{Li}$ es un boson compuesto y ${}^6\text{Li}$ es un fermión compuesto. Las propiedades físicas fundamentales del litio están listadas en la tabla 1.

Propiedades	Símbolo	Valor
Densidad (300 K)	ρ	0,534 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Punto de fusión	T_M	453,69 K
Calor de fusión	Q_F	2,99 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
Punto de Ebullición	T_B	1615 K
Calor de vaporización	Q_V	134,7 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

Tabla 1. Propiedades físicas fundamentales del litio

Al generar una fuente de vapor a partir del litio se genera una presión de vapor. El número de densidad atómica esta directamente relacionado a la presión de vapor y es el parámetro ajustable primario para entregar un haz atómico o una fuente de vapor de átomos. La presión de vapor del litio para sus fases sólida (desde 298 [K] hasta 453,69 [K] que es el punto de fusión del litio) y líquida (453,69 a 1000 [K]) está dada por la Ec.1 y Ec.2 respectivamente.

$$\log_{10} P_{V_{\text{solido}}} = 10,6730 - 8310 \cdot T^{-1} \quad (1)$$

$$\log_{10} P_{V_{\text{liquido}}} = 5,055 - 8023 \cdot T^{-1} \quad (2)$$

El cálculo teórico de la presión de vapor, generada con una muestra de litio a la que se le aplican distintos valores de temperatura para su evaporación dentro de un horno o celda de calibración, se obtiene desde la Ec.2 (obtenida desde ref.[13]) y se muestra en el gráfico de la Fig.2 para valores de entre 300 [°C] y 440 [°C] por ser el rango de valores utilizados en este trabajo.

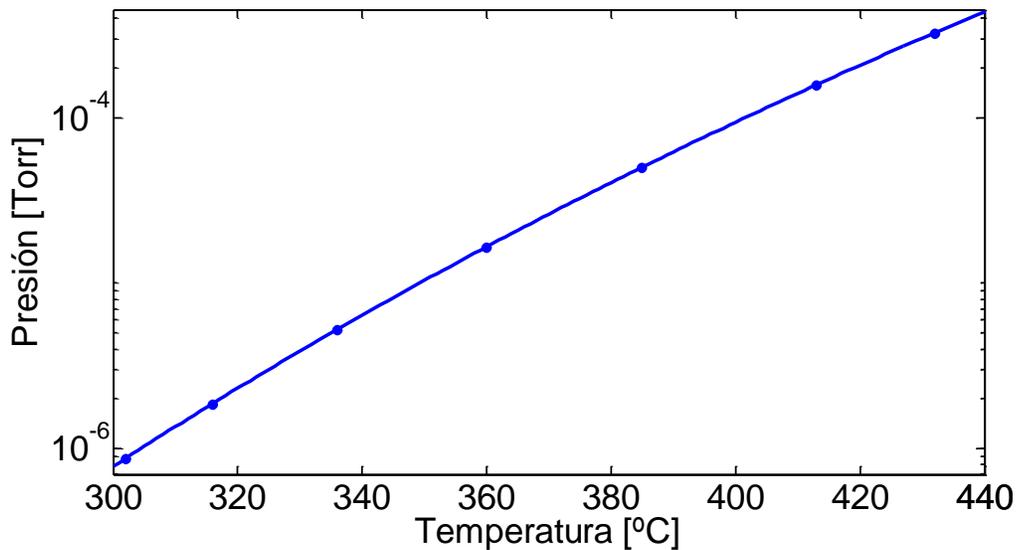


Figura 2. Se observa la línea de tendencia que muestra de forma suave como aumenta la presión de vapor del sistema a medida que sube la temperatura de una muestra de litio una vez que ya está en fase líquida. Los puntos azules muestran algunas de las temperaturas importantes para el experimento de absorción con que se conforma la curva (302 [°C], 316 [°C], 336 [°C], 360 [°C], 385 [°C], 413 [°C] y 432 [°C]). Las mediciones de absorción entregan directamente la información acerca de la densidad molar o directamente la cantidad de partículas por unidad volumétrica.

Dada la información de presión que entrega este gráfico para un conjunto de temperaturas entre 300 [°C] y 440 [°C], se puede calcular teóricamente el número de partículas por cada m³ dentro de un horno utilizando la ecuación de gases ideales que se aprecia en la Ec.3, usando la constante $k=1,3806503 \cdot 10^{-23}$.

$$PV = NkT \quad (3)$$

En donde P es la presión de vapor, V es volumen que ocupa el gas, N el número de moléculas, K la constante de Boltzman y T la temperatura de la muestra de Litio.

La Fig.3 muestra la tendencia del número de partículas por cada m³ dentro de horno para cada temperatura dentro del rango de 300 [°C] y 440 [°C].

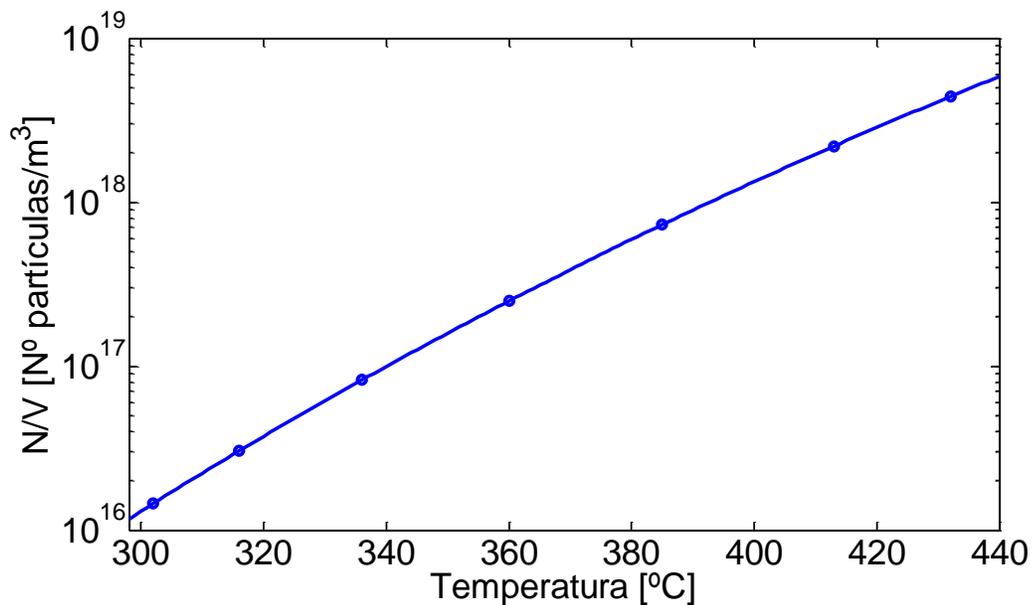


Figura 3. Número de partículas por cada m³ que se alcanza para temperaturas de una muestra de litio entre 300 [°C] y 440 [°C] dentro de un horno o celda de litio. Los puntos azules resaltan algunos de los valores con que se conforma el gráfico y que son relevantes para el experimento de absorción (302 [°C], 316 [°C], 336 [°C], 360 [°C], 385 [°C], 413 [°C] y 432 [°C]). Se observa el aumento de partículas/m³ a medida que aumenta la temperatura y por consiguiente, la presión de vapor.

El gráfico de la Fig.3 muestra la línea de tendencia del número de partículas por unidad de volumen dentro de un horno cuando las temperaturas de la muestra dentro de ella van entre los 300 [°C] y 440 [°C]. En la figura se resaltan las temperaturas 302 [°C], 316 [°C], 336 [°C], 360 [°C], 385 [°C], 413 [°C] y 432 [°C] que conforman la curva y que son valores relevantes para el experimento de absorción. Para una lectura de mayor precisión, se muestran en la tabla 2, los valores calculados de presión de vapor y número de partículas en unidad volumétrica para cada temperatura de la muestra resaltada en los gráficos anteriores.

Temperatura [°C]	Presión de Vapor [Torr]	Densidad de partículas [N° Partículas/m ³]
302	8,643E-07	1,451E+16
316	1,854E-06	3,039E+16
336	5,191E-06	8,230E+16
360	1,639E-05	2,499E+17
385	4,964E-05	7,284E+17
413	1,561E-04	2,196E+17
432	3,224E-04	4,415E+18

Tabla 2. Los datos mostrados indican los valores de la presión de vapor y la densidad de partículas por unidad de volumen para las temperaturas de la muestra de litio resaltadas en el cálculo de presión de vapor presentadas en la Fig.2.

Por último, un dato importante a la hora de realizar experimentos de absorción es que se debe considerar que la intensidad de saturación para un vapor de litio es $I_{sat} = 2,7 \left[\text{mW}/\text{cm}^2 \right]$ por lo cual se debe tener precaución con la intensidad del láser con el que se trabaja y utilizar en estos experimentos una intensidad igual o menor a la Intensidad de saturación.

2.2 Diodos Láser

El láser de diodo es un dispositivo opto electrónico que emite luz coherente. El diodo presenta una estructura compuesta por heterojunturas entre diferentes materiales semiconductores que tienen diferentes índices de refracción. En la Fig.4 se observa un esquema de un diodo láser con su estructura de capas y sus modos de oscilación.

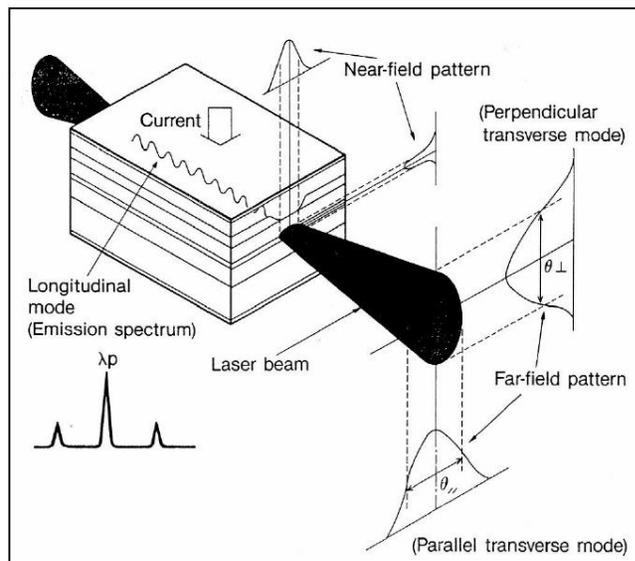


Figura 4. Estructura de capas de un diodo láser y sus modos de oscilación.

La luz láser se genera enviando una corriente de inyección a través de la región activa del diodo entre los estratos de tipo n y p. Esto produce electrones y huecos, los cuales en turno se recombinan y emiten fotones. La longitud de la onda de emisión del láser es determinada por el gap de banda del material semiconductor. La inversión de población de los pares electrón-hueco está restringida a una región estrecha en la capa activa, por lo cual la ganancia óptica es espacialmente localizada. La estructura compuesta por heterojunturas sirve como una guía de onda óptica. La capa activa tiene un alto índice de

refracción en las paredes circundantes, de modo que la luz queda confinada a un canal de reflexión interna. La cara posterior del chip actúa como un espejo reflector encerrando la cavidad láser, y la pared divisoria al final del chip, sirve como espejo de salida de la cavidad. Estas caras forman una cavidad de Fabry Perot. Esta pared puede ser impregnada de algún material para aumentar o disminuir su reflectividad. El diodo láser está confinado a un canal estrecho aproximadamente de 2 [μm] de alto, 10 [μm] de ancho y alrededor de 400 [μm] de largo. El ancho espectral de la emisión de un láser desnudo es de alrededor de $\Delta\nu = 30-50$ [MHz]. El láser posee distintos modos espaciales que son definidos por el canal estrecho que confina la luz. Debido a que el canal es rectangular y no es mucho más largo que la longitud de onda de la luz, el haz de salida es elíptico (alargado en la dirección perpendicular al plano de la juntura) y fuertemente divergente. La luz del láser está fuertemente polarizada con el campo eléctrico paralelo al plano de la juntura. El modo de oscilación espacial del láser está definido por el canal delgado en la región activa que confina luz. Este confinamiento del modo transversal del láser es logrado a través de la variación de la corriente de inyección (ganancia guiada) o por la variación en el índice de refracción debido a cambios en los materiales usados en la construcción del láser (índice guiado). Los láseres de diodo tienen dos propiedades indeseables. La primera es que sus anchos de línea son grandes ($\Delta\nu \sim 50$ [MHz]) comparados a los anchos de línea de las transiciones atómicas y en segundo lugar estos son extremadamente sensibles a la retroalimentación óptica, tan solo una cantidad tan pequeña como 10^{-6} de la luz de salida dispersada hacia atrás dentro del láser puede afectar su estabilidad de frecuencia. La frecuencia del láser depende del índice de refracción del material semiconductor, retroalimentación óptica, corriente de inyección y de la temperatura. Para sintonizar un láser a una transición atómica, es útil entender como estos factores determinan la frecuencia de salida del láser. El diodo láser tiende a emitir luz coherente a la frecuencia del modo de oscilación con más ganancia neta (es decir, la emisión estimulada menos las pérdidas ópticas). Una vez que el láser empieza a emitir en este modo, la emisión estimulada limita el número de pares electrón-hueco que están disponibles para emitir la luz coherente en otros modos, y el resultado es un

láser con un modo único (frecuencia única). Para determinar la frecuencia de operación de láser, necesitamos encontrar la frecuencia con más alta ganancia neta. En la Fig.5 se observa la contribución y la importancia de cada factor que determina la frecuencia de operación del diodo láser. La ganancia del medio depende principalmente del gap de banda (ancho de la banda de emisión) del material del semiconductor. La ganancia de esta contribución depende principalmente de la temperatura. Respecto a la cavidad interna, esta forma un pequeño etalón Fabry Perot, y como toda cavidad, tiene una estructura de modos normales. Por lo tanto, el aporte de esta cavidad a la ganancia es dependiente de la frecuencia. Cuando a la estructura del láser se le agrega una cavidad externa, se extiende la cavidad total del diodo láser, es decir, se suma la cavidad externa a la interna y se comienza a trabajar con una cavidad extendida en donde existe la posibilidad de sintonizar el láser en frecuencia dentro de un rango mayor o extendido y no solo limitado a la cavidad interna y el medio.

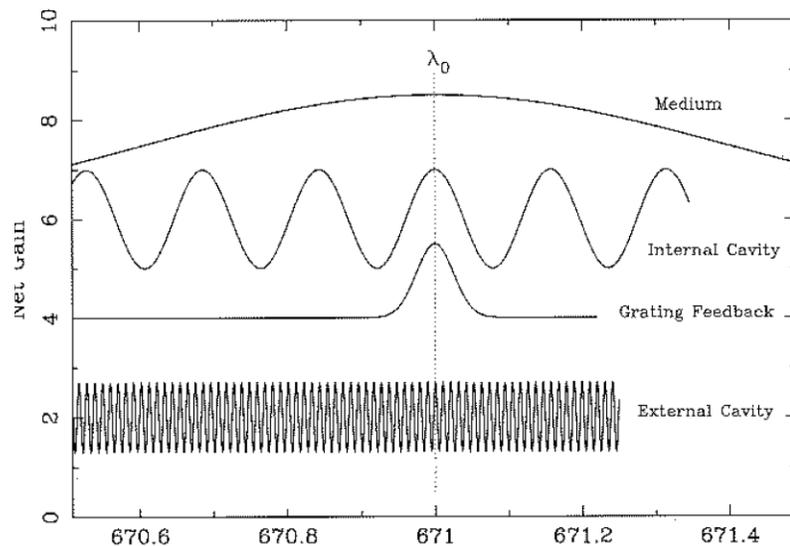


Figura 5. Contribuciones de variables en la ganancia del diodo láser

2.3 Uso de cavidades externas Littrow y Littman-Metcalf

Un láser de semiconductor es capaz de generar luz coherente y puede ser controlado de forma única en base al control de temperatura y corriente de este. A partir de estas dos variables, se es capaz de sintonizar la longitud de onda de la luz monocromática que el diodo láser emite. La desventaja de utilizar métodos de sintonización solamente en base a temperatura y corriente es que el láser no siempre cuenta con la suficiente estabilidad de emisión, es decir, pueden existir saltos en la frecuencia del láser puesto que distintas frecuencias están compitiendo por ser emitidas en el semiconductor dada su cavidad interna que permite un número de longitudes de onda de emisión dentro de un rango de frecuencias, que si bien es angosto, resulta muchas veces, no ser lo suficiente para técnicas espectroscópicas. Es por lo anterior, que para sintonizar de forma fina y darle estabilidad y ganancia a la emisión de un diodo láser, este puede ser montado en una configuración que extienda su cavidad externamente, y que al variarla, pueda seleccionar la longitud de onda de emisión, generándose a la vez la selección de una cavidad para obtener anchos de línea angostos, es decir, que la luz emitida contenga un rango muy pequeño de frecuencias (ancho de banda angosto) y con un mínimo de *saltos de modos* o saltos de frecuencia (mode hops). Las configuraciones más utilizadas para generar una cavidad externa al diodo láser, para selección de longitudes de onda, son Littrow y Littman-Metcalf.

2.4 Saltos de Modos

La cavidad externa de un láser de todo tipo debe proporcionar una sintonización continua y con un mínimo de saltos de modos. Los *saltos de modos* (mode hops), son cambios discontinuos en la longitud de onda del láser o es lo mismo decir, saltos en frecuencia. Estos son un resultado de la competición de modos o frecuencias en el diodo láser (i.e. el láser oscilará en el modo que tiene la más alta ganancia neta en la cavidad).

2.5 Láser con cavidad Littrow

Este tipo de láser está compuesto por un diodo láser de bajo costo emitiendo en ángulo respecto a una red de difracción sobre una montura cinemática que lo retroalimenta lo que genera una cavidad láser externa continuamente sintonizable. Al incidir la luz sobre una ranura de una red de difracción, como se ve en Fig.6, la luz es difractada en distintos órdenes de difracción entorno al porcentaje de luz incidente que es reflejada especularmente. La luz difractada contiene todas las frecuencias o longitudes de onda de la luz incidente. Solo la luz difractada desde las distintas ranuras que estén en fase generará interferencia constructiva. Para ejemplificar se puede pensar, como en Fig.7, que un haz de luz incide sobre dos rejillas adyacentes con un ángulo de incidencia α . Solo se obtiene interferencia constructiva para la luz reflejada en la dirección β . Por lo que la condición de la red es $\alpha = \beta$, como se observa en Fig.8, o condición de cavidad *Littrow*. La ecuación general para una red de difracción es mostrada en la Ec.4, por lo que se debe tomar el signo + en el caso que α y β estén del mismo lado de la normal y – si están en lados opuestos. La ecuación general, Ec.4, se convierte por lo tanto, con la condición de interferencia constructiva, en lo mostrados en Ec.5. De aquí se puede obtener el ángulo en que se debe hacer incidir la luz para obtener la longitud de onda deseada. Una muestra de la condición de la red se observa en Fig.8.

$$m\lambda = d(\sin(\alpha) \pm \sin(\beta)) \quad (4)$$

$$m\lambda = 2d \sin(\alpha) \quad (5)$$

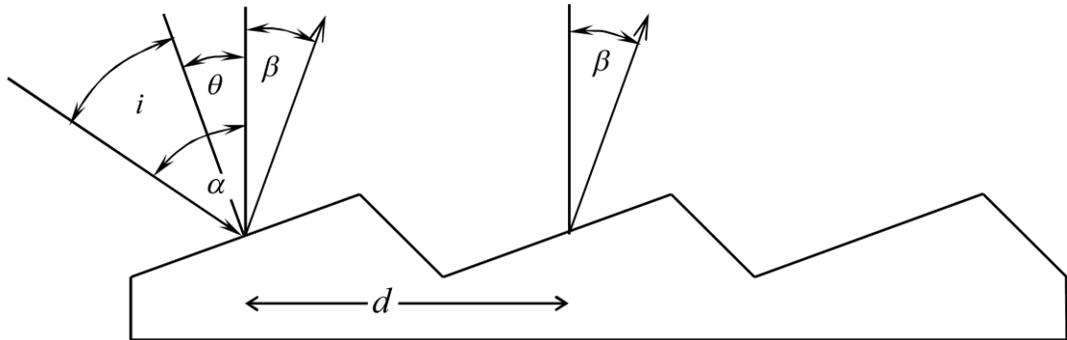


Figura 6. Difracción sobre una ranura de una red de difracción

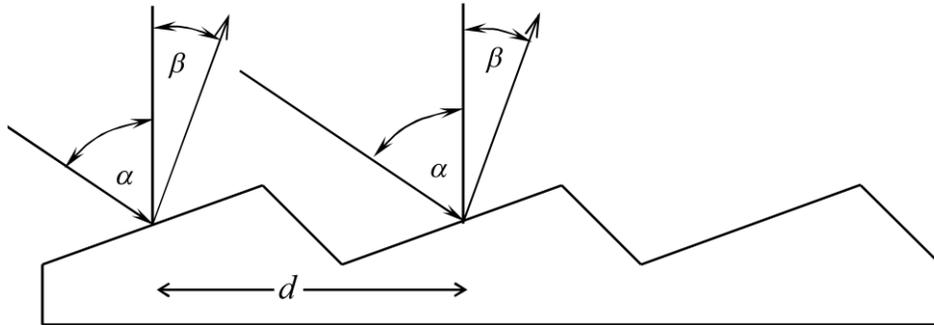


Figura 7. Incidencia sobre dos ranuras de una red de difracción

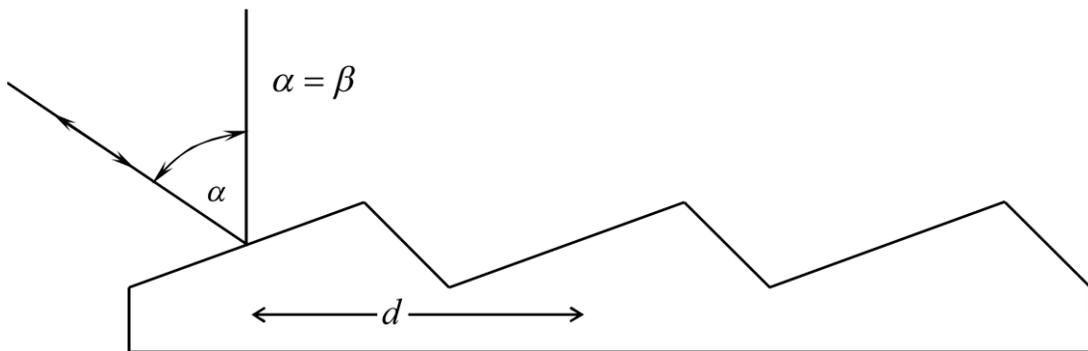


Figura 8. Condición $\alpha = \beta$ para la red, condición para cavidad Littrow

2.6 Láser con cavidad Littman Metcalf

Este tipo de láser consiste en un módulo láser o diodo láser intercambiable y de bajo costo en una cavidad láser externa continuamente sintonizable. La cavidad externa es de un diseño Littman Metcalf y esta compuesto de una red de difracción en incidencia rasante con respecto al diodo láser como se muestra en la Fig.9. El primer orden del haz es difractado hacia el espejo de ajuste o sintonizador. La retroreflexión desde el espejo sintonizador selecciona que longitud de onda es difractada hacia adentro de la estructura de la guía de onda del diodo láser. La cara trasera altamente reflectiva del diodo láser sirve como el otro espejo final de la cavidad láser. El haz de salida es el orden cero de difracción fuera de la red .Ya que la red de difracción y el modulo láser permanecen estacionarios durante la sintonización, este haz no se mueve mientras el láser esta siendo sintonizado.

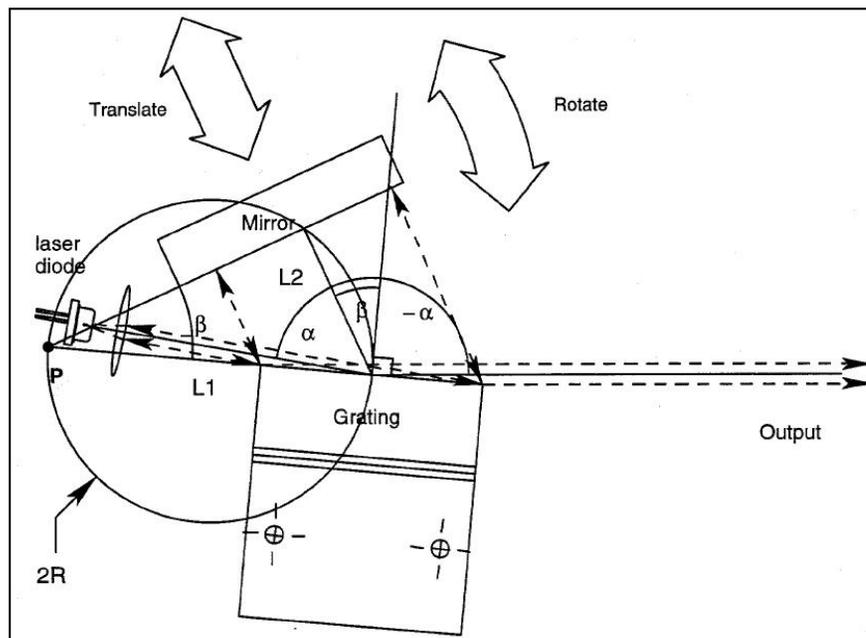


Figura 9. Cavidad Littman Metcalf externa del diodo láser

La geometría para una cavidad externa para eliminar los saltos de modo es incrementar la longitud de la cavidad en proporción a la longitud de onda. Además, para la cavidad externa, existe otra cavidad formada por las dos caras de la superficie del diodo láser. Los modos longitudinales de un diodo láser están típicamente separados por 150 [GHz]. Estos modos son suprimidos del diodo por tener una cara reflectiva del diodo de 10^{-5} y por usar una configuración de la red con una resolución mucho más estrecha que el rango espectral libre del diodo láser. La reflectividad residual entrega una modulación de la potencia total de un 5 a 20% en el periodo del rango espectral libre del diodo. La categoría final de competición de modos ocurre debido a la aberración del frente de onda. La aberración del frente de onda es debida al desalineamiento del lente, desenfoque de dispersión y por la red o el espejo que tienen un error de frente de onda. Cuando se escanea el láser en un largo rango de longitudes de onda, solo se esta libre de saltos de modo cuando se sintonice desde bajas hasta altas longitudes de onda y no al revés. La demostración de tal sistema es pensar en que se debe mantener la cantidad de longitudes de onda constante dentro de la cavidad lo cual implica para una cavidad *Littman Metcalf* el hacer que el espejo sintonizador o de ajuste gire entorno a un pivote específico. El punto pivote crea una relación entre la longitud de la cavidad y la longitud de onda del láser. La longitud de onda del láser es definida, como se muestra en Ec.6, por una ley de difracción estándar de la luz que sale de la red de difracción

$$\lambda = \Lambda(\sin(\theta_d) + \sin(\theta_i)) \quad (6)$$

En Ec.6, Λ es el espaciado entre las rendijas de la red mientras θ_i y θ_d se refieren al ángulo incidente y de difracción del haz láser medidos desde una línea normal a la superficie de la red. La longitud D de la cavidad puede ser dividida en dos partes, l_1 y l_2 . Si se llama L a la distancia desde el punto pivote hasta el lugar donde el haz incide rasante en la red, se puede ver que $l_1 = L \sin(\theta_i)$ y $l_2 = L \sin(\theta_d)$ (ver Fig.10). De esta forma si llamamos L_C a la longitud total de la cavidad obtenemos la Ec.7.

$$L_c = L(\sin(\theta_d) + \sin(\theta_i)) \quad (7)$$

Luego, se hace la proporción entre la longitud de la cavidad y la longitud de onda

$$\frac{L_c}{\lambda} = \frac{L}{\Lambda} = \text{constante} \quad (8)$$

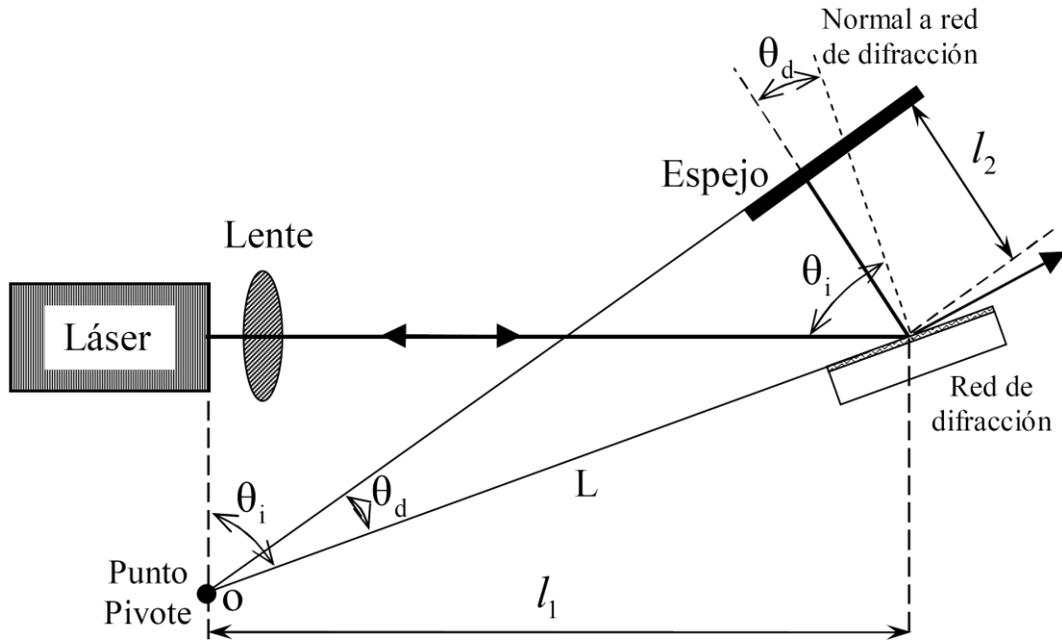


Figura 10. Esquema punto pivote cavidad Littman Metcalf

Se hace evidente que la relación entre la longitud de la cavidad y la longitud de onda es una constante que se debe mantener para eliminar los saltos de modo de la emisión láser.

2.7 Interferómetro Fabry Perot confocal

Un interferómetro Fabry Perot es un instrumento simple que permite la interferencia de múltiples haces, pero más importante aún, permite estudiar la estabilidad de un láser mediante el análisis de sus modos de oscilación que son mostrados a través de este instrumento observando la función de Airy. Lo anterior, se resume en la capacidad de medir el espectro en frecuencia de un láser. Esto consiste de dos espejos parcialmente transmisores que son alineados en forma precisa para formar una cavidad reflectiva. En este trabajo, se construye una cavidad reflectiva confocal, lo que implica el uso de dos espejos plano cóncavos con reflectividades de 99,5% para obtener mayor resolución del instrumento. La cavidad de un interferómetro Fabry Perot confocal tiene como condición posicionar dos espejos plano cóncavos idénticos a la distancia del radio de

curvatura R que estos tienen, para de esta forma, formar la cavidad reflectiva. La luz incidente entra a la cavidad Fabry Perot y se somete a múltiples reflexiones entre los espejos, entonces la luz puede interferir con si misma muchas veces. Si la frecuencia de la luz incidente es tal que la interferencia constructiva ocurre en la cavidad Fabry Perot, la luz podrá ser transmitida. Visto de otra manera, la interferencia destructiva no permitirá ningún paso de la luz a través del interferómetro Fabry Perot. Una muestra gráfica de la configuración Fabry Perot confocal se puede observar en la Fig.11 y en la Fig.12. La Fig.11 muestra la ambos espejos plano cóncavos alineados en condición confocal y la Fig.12 un esquema con los haces que entran a esta cavidad en su proceso de interferencia. Además, se puede observar como complemento, la Fig.13 que entrega una vista de la configuración de instrumentos y conexiones básicas para poder medir con un interferómetro Fabry Perot confocal. La condición para la interferencia constructiva dentro de un interferómetro Fabry Perot confocal es que la onda luminosa forme una onda estacionaria entre los dos espejos. En otras palabras, la distancia óptica entre los dos espejos, debe ser igual a un número entero de un cuarto de longitud de onda de la luz incidente. La condición de interferencia constructiva esta definida por la Ec.9.



Figura 11. Esquema de condición confocal para dos espejos plano cóncavos para la formación de un FPI confocal.

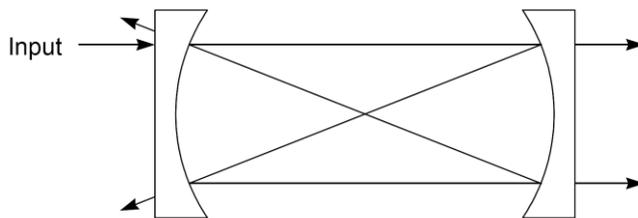


Figura 12. Configuración de alineación con condición confocal de dos espejos plano cóncavos para la formación de un FPI confocal que muestra proceso de interferencia de los haces dentro de la cavidad.

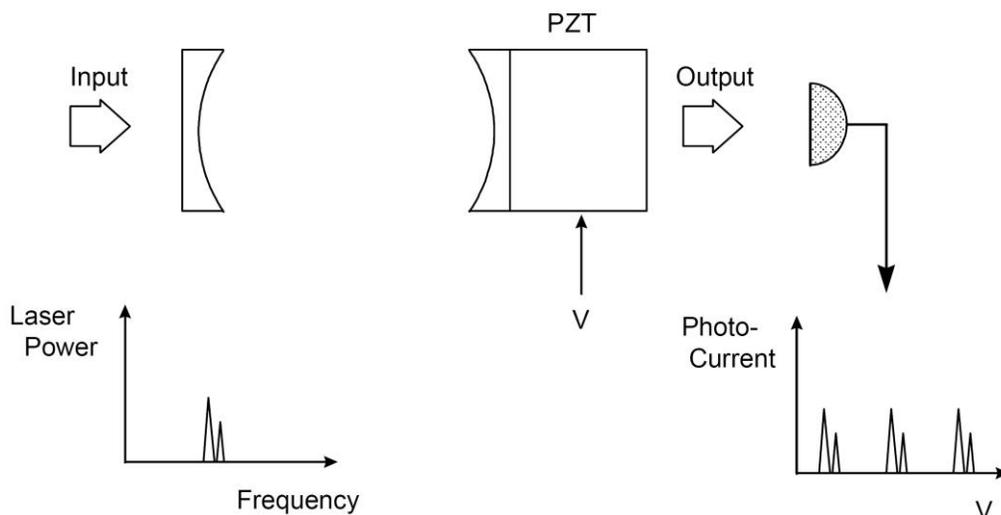


Figura 13. Instrumentación y conexión experimental básica para la medición con FPI confocal

$$nd \cos(\theta) = \frac{m\lambda}{4} \quad (9)$$

En la Ec.9, m es un término entero llamado orden de interferencia, n es el índice de refracción del medio entre ambos espejos, d es la separación entre espejos y θ es la inclinación de la dirección de la radiación de entrada a la normal de los espejos. Un interferómetro Fabry Perot tiene por característica contar con un rango espectral libre (FSR), que es la diferencia en frecuencia entre franjas de interferencia consecutivas

definido en la Ec.10 y observable en la Fig.17 para un interferómetro Fabry Perot confocal.

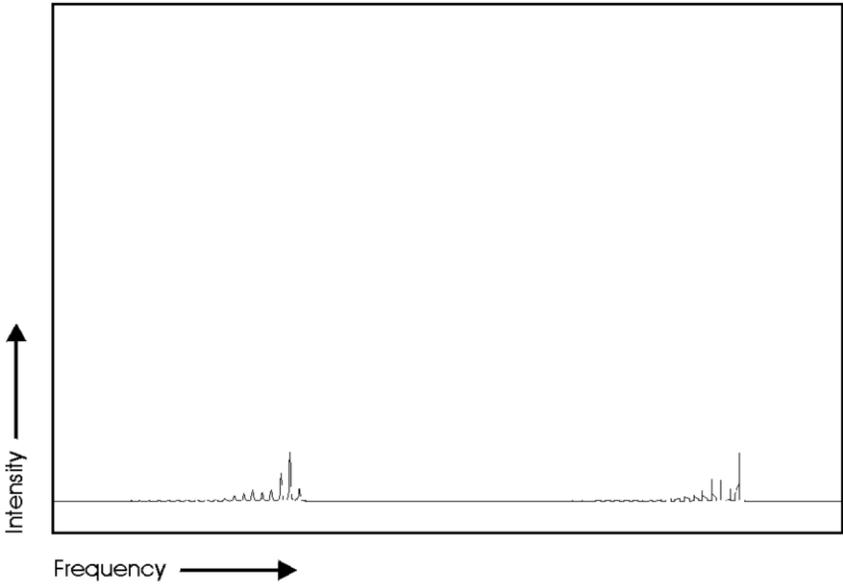


Figura.14. Señal de un interferómetro comercial Fabry Perot confocal cuando el espaciado entre espejos de la cavidad tiene una diferencia de 1[mm] respecto a una distancia de radio de curvatura, condición de un FPI confocal.

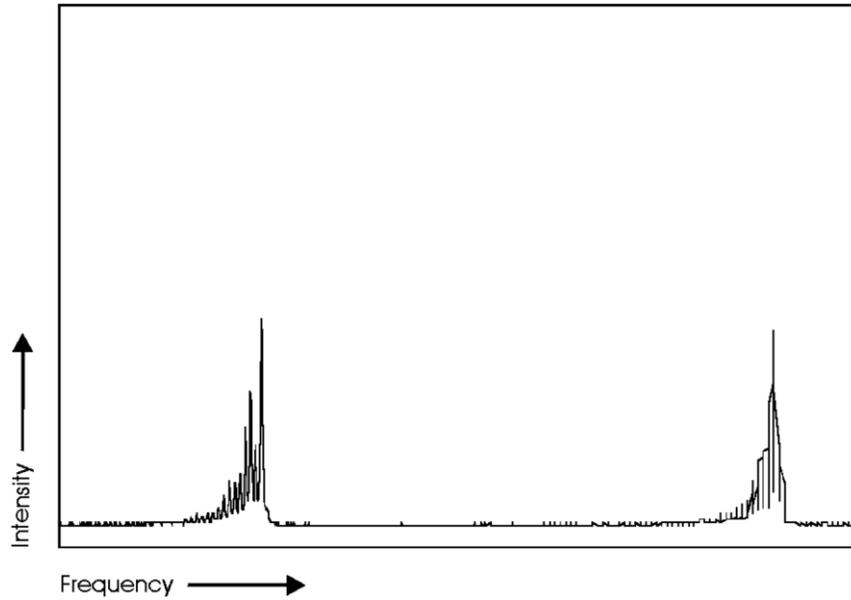


Figura 15. Señal de un interferómetro comercial Fabry Perot confocal cuando el espaciado entre espejos de la cavidad tiene una diferencia de 0,6 [mm] respecto a una distancia de radio de curvatura, condición de un FPI confocal.

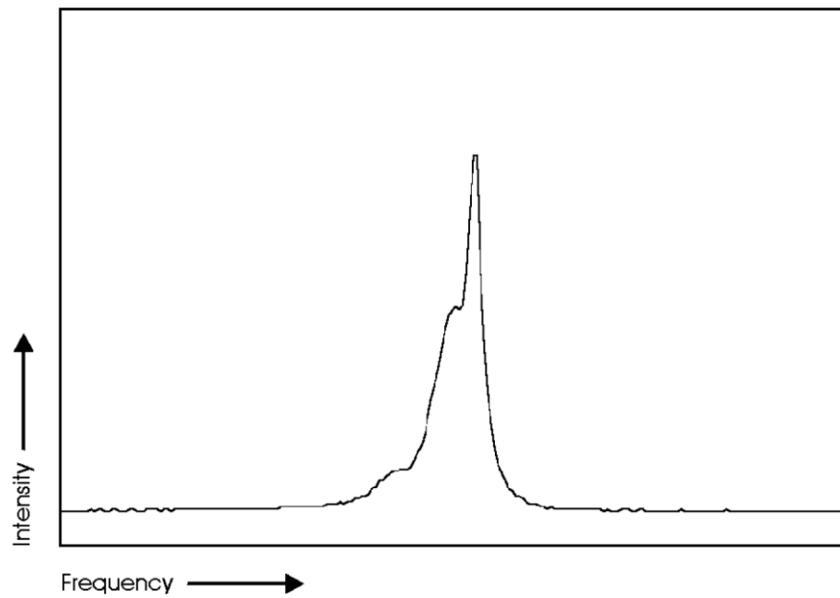


Figura 16. Señal de un interferómetro comercial Fabry Perot confocal cuando el espaciado entre espejos de la cavidad tiene una diferencia de 0,15 [mm] respecto a una distancia de radio de curvatura, condición de un FPI confocal.

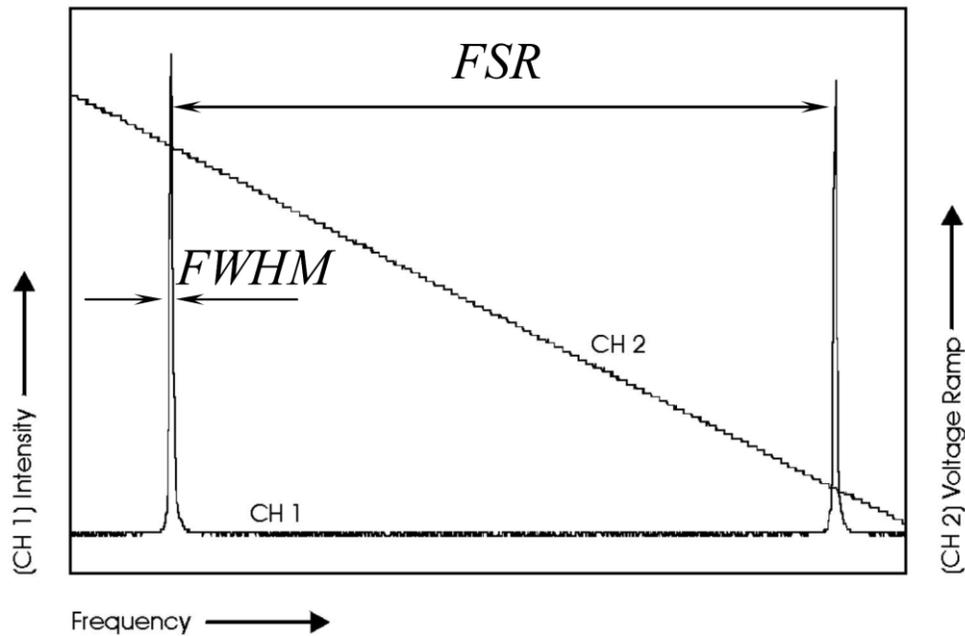


Figura 17. Señal de interferómetro comercial Fabry Perot confocal cuando el espaciado entre espejos de la cavidad es cercano al radio de curvatura en forma casi exacta, condición de un FPI confocal. Se muestra también *FSR* Y *FWHM*.

$$FSR = \frac{c}{4L} \quad (10)$$

En la Ec.10, c indica la velocidad de la luz, el parámetro L indica la separación entre los espejos de un interferómetro Fabry Perot confocal. Otro parámetro que caracteriza un interferómetro Fabry Perot es la Finesse (ver Ec.11). Este es un factor que indica el rendimiento del interferómetro Fabry Perot, en donde R es la reflectividad de los espejos utilizados en el FPI confocal.

$$Finesse = \frac{FRS}{FWHM} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (11)$$

La Ec.11 leída conceptualmente, indica que la Finesse puede ser pensada como el número de haces que interfieren dentro de la cavidad del interferómetro. Un alto valor de la Finesse, indica un gran número de ondas interfiriendo, resultando en un proceso de interferencia más completa y de esta forma se obtiene una alta resolución.

Un proceso de obtención de alta Finesse se puede observar en figuras secuenciales desde la Fig.14 hasta la Fig. 17, en donde una vez que se ha fijado la alineación de los espejos respecto al eje definido para un interferómetro Fabry Perot (FPI) confocal ,solo queda llevarlo a la condición confocal, es decir, que la cavidad entre los espejos tenga una distancia igual al radio de curvatura de los espejos con que está fabricado. La Fig.14 comienza mostrando una distanciamiento de 1 [mm] respecto a la condición confocal hasta finalizar en la Fig.17 en donde la condición se consigue, obteniéndose una alta Finesse para la señal del FPI confocal. Se puede entender también que la medida de la Finesse depende de la reflectividad de los espejos plano cóncavos que componen un interferómetro Fabry Perot confocal dado que a mayor luz interfiriendo mayor es este número adimensional. En la Ec.11 se observa el termino *FWHM* al cual se le denomina banda de ancha mínimo de resolución el cual es el ancho (ancho en la mitad del peak de intensidad) de una franja de interferencia generada cuando una fuente de luz perfectamente monocromática es transmitida por un interferómetro Fabry Perot. Este concepto gráficamente se aprecia en la Fig.17.

Capítulo 3

Experimento

Una configuración básica del experimento que se realizó en este trabajo consistió en obtener la absorción de un haz de luz láser entorno a la longitud de onda $\lambda = 670[\text{nm}]$ en un vapor de litio neutro, mediante cuatro elementos básicos, estos son, un láser sintonizable, un horno (cámara de vacío más sistema de calentamiento) que genere vapor de litio neutro en su interior, un interferómetro *Fabry Perot* para analizar el funcionamiento del láser entre otros y un monocromador para tener lectura de la longitud de onda en la que está centrada la emisión del láser. El primer elemento básico para realizar la absorción en gas de litio neutro es contar con láseres sintonizables emitiendo entorno a la longitud de onda de $\lambda = 670[\text{nm}]$. Los láseres sintonizables con que se cuenta para conseguir el objetivo de este trabajo son uno de fabricación propia y uno comercial. El láser de fabricación propia, es un láser sintonizable fabricado en configuración *Littrow*, utilizando como guía de construcción a ref.[1]. Este sistema láser es capaz de soportar distintos diodos láser cuidando siempre el tipo de polaridad del circuito de protección de corriente que fue instalado. Los diodos láser utilizados fueron HL6714G (Hitachi) y TOLD 9221M (Toshiba) pero se finalizó trabajando con este último. El otro láser, es comercial. Este láser es el *Láser 2010 EOSI* que tiene como características principales que esta fabricado en configuración *Littman-Metcalf* y cuenta con un diodo (SN00660@70mA) con una data de aproximadamente 15 años desde su primer uso y que se puso a prueba su funcionamiento en este trabajo. Además, cuenta con un panel general de controles que manejan la temperatura, el voltaje de barrido de su piezoeléctrico, la corriente de alimentación del diodo láser y algo aún más relevante, un control de la longitud de onda de emisión. El segundo elemento básico, fue contar con un horno para evaporar muestras de litio sólido. Se usaron dos hornos disponibles para realizar la absorción en gas de litio neutro, uno comercial y uno de fabricación propia. El

horno de fabricación propia es un horno al vacío que cuenta con la capacidad de evaporar litio mediante el posicionamiento de un cilindro de Al-Li dentro de una cámara de vacío y que es calentada mediante ladrillos refractarios en forma de abrazadera, con dos ampollas de haluro metálico posicionado alrededor de donde se coloca la muestra, o alternativamente, mediante kanthal enrollado entorno a la misma zona. El horno de tipo comercial es uno denominado Heat Pipe que consiste en una pipa con un material refractario que contiene un alambre de alta resistencia eléctrica en su interior y que eleva la temperatura de la muestra de litio sólido posicionada en el medio de la pipa. El horno puede alcanzar temperaturas de alrededor de 900 [°C] mediante un controlador de corriente que alimenta con corriente la resistencia dentro del material refractario con que cuenta el horno. El tercer elemento relevante es la utilización de un interferómetro Fabry Perot. Se cuenta con dos interferómetros Fabry Perot confocales en el laboratorio, uno construido para este trabajo para longitudes de onda de $\lambda = 670[\text{nm}]$ y uno comercial. Tanto el interferómetro comercial como el de construcción propia son para la misma longitud de onda pero con diferencias en su resolución. El interferómetro de construcción propia cuenta con un $FSR=3$ [GHz] ya que fue fabricado con espejos plano cóncavo con reflectividad de 99,5% y un radio de curvatura de 25 [mm]. Por su lado el interferómetro comercial, de la empresa Burleigh, tiene un $FSR= 2$ [GHz]. Estos interferómetros disponibles permiten tener lectura de la estabilidad y rango en el barrido del láser. Por último, el cuarto elemento básico para el experimento es un monocromador (Thorlabs) para tener lectura y referencia del centrado de la longitud de onda del haz que se envía a horno y que se esta sintonizando mediante un barrido. En resumen, para lograr la absorción en gas de litio neutro se definieron cuatro pasos a seguir para contar con un óptimo funcionamiento de la instrumentación, manejo de la técnica y posterior elección de los mejores elementos para conseguir el objetivo de absorción en vapor de litio neutro.

1. Medición de potencia de láseres disponibles de longitudes entorno a $\lambda = 670[\text{nm}]$, es decir de láser 2010 EOSI y diodo láser TOLD9221M

(Toshiba) utilizado en construcción de sistema láser de construcción propia en laboratorio.

2. Análisis de barrido en frecuencia en láseres a utilizar. En este paso se realizaron pruebas para obtener información acerca de cuanto es posible barrer con cada láser a utilizar a través de los piezoeléctricos con que cuenta cada uno de ellos.
3. Análisis de funcionamiento de interferómetros Fabry Perot (FPI) confocales comercial (Burleigh) y de construcción propia, de forma de analizar el buen funcionamiento comparativo del FPI confocal construido respecto a las características y rendimientos conseguidos con los comerciales. Adicionalmente se usó un FPI confocal comercial FPI100 (Toptica) no disponible para el experimento, solo para análisis comparativo.
4. Realizar experimento de absorción. En este paso se debe haber obtenido la información suficiente para seleccionar los elementos con mejor rendimiento para utilizarlos conjuntamente, es decir, láser, interferómetro y horno para generación de vapor de litio neutro.

3.1 Diseño y fabricación de un interferómetro Fabry Perot confocal

El diseño y fabricación del interferómetro Fabry Perot se basa en la escasez de interferómetros de la longitud de onda usada en la absorción en gas de litio neutro ($\lambda=670$ [nm]). Además, la construcción esta motivada por contar, en el laboratorio de óptica, con espejos cóncavos para la longitud de onda usada que están a disposición de los proyectos por lo que es necesario darles uso. El interferómetro Fabry Perot es de configuración confocal, es decir, se utilizan dos espejos plano-cóncavos (VLOC, modelo ROC=25 mm CC, SMC12.7-9.525-25FS-3028-671-0) de 99,5% R/AR para longitudes de 670 [nm] distanciados un distancia ROC sobre el eje óptico que define la unión entre el centro de cada uno, siendo ROC el radio de circunferencia de los espejos. La perfecta alineación de un FPI es extremadamente sensible a la distancia que separa a

los dos espejos y a su frontalidad, por lo que el diseño cuenta con esta consideración en las monturas que sustentan a ambos espejos.

Para posicionar a ambos espejos perfectamente frontales se diseñan dos piezas desde el mismo tubo de duraluminio (dural) para que la concentricidad de ambos se aproxime a lo ideal. Se considera la fabricación en duraluminio de las piezas pues el dural tiene baja expansión y contracción debido a cambios térmicos.

3.2 Montura de primer espejo

El primer espejo, para ser fijado y centrado, se posó dentro de un cilindro de duraluminio. Este cilindro cuenta con 4 diámetros interiores principales distintos (Fig.18). De izquierda a derecha en la Fig.18, el diámetro (1) es para el O-Ring que sostiene y centra el espejo. El diámetro (2) es realizado de tal forma que el cable exterior soldado en el piezoeléctrico quepa entre la superficie en donde esta soldado el cable (superficie piezoeléctrico) y la estructura que lo sostiene. El diámetro (3), muestra una “pequeña pestaña” en donde el piezoeléctrico cilíndrico es puesto de tal forma de dejarlo perfectamente centrado en la estructura. El diámetro (4) es el agujero por donde pasa la luz. Los cuatro diámetros de los agujeros pasados son concéntricos. El diámetro número (5) de la Fig.18, indica que existe un agujero pasado, de igual diámetro del cable que esta conectado a piezoeléctrico. El diámetro número (6) de la misma figura, da cuenta del diámetro exterior de la estructura, realizada con las medidas necesarias para que sea soportada en una montura cinemática de 1” (Thorlabs, modelo KM100). En la Fig.19 se aprecian las medidas con que se fabrica la montura para el primer espejo.

3.3 Sistema piezoeléctrico - Espejo plano cóncavo

Para el sistema de barrido del interferómetro Fabry Perot se debe crear un sistema conformado por el espejo plano cóncavo (VLOC, modelo ROC=25 mm CC, SMC12.7-9.525-25FS-3028-671-0) y un piezoeléctrico (Channel, modelo Hollow Cylinder O.D..500”Wall.031”L .500”Material: C5500). Primero se deben soldar dos cables al piezoeléctrico cilíndrico, en donde se debe tener especial cuidado al hacerlo pues se hace de una sola vez ya que el calor consume la superficie del piezoeléctrico al punto que luego es imposible soldar en el mismo lugar. Las soldaduras deben ser puntuales y en lo posible planas para que quepa dentro del pequeño espacio que le permite la estructura diseñada para primer espejo plano cóncavo. El espejo cuenta con dos lados, uno cóncavo y el otro plano, por lo que se pega con epoxi la superficie plana del espejo junto a uno de los bordes del piezoeléctrico. El pegado con este epoxi debe ser cuidadoso de forma de no desbordarlo hacia el espejo cuando se juntan ambas estructuras. Al lograr esta juntura se posiciona este nuevo subsistema dentro del cilindro con agujeros concéntricos de la Fig.18, colocando epoxi en el tercer diámetro o “pestaña” y posicionando el piezoeléctrico. Inmediatamente luego de esto se coloca el O-Ring que centra el espejo en cilindro, logrando el resultado visto en Fig.19. El piezoeléctrico es el encargado de hacer, mediante la aplicación de un alto voltaje, el movimiento fino de barrido entre ambos espejos plano cóncavos, cambiando la distancia entre espejos. Lo anterior provoca el barrido del interferómetro que tiene por finalidad estudiar los modos del láser. Dado que se debe aplicar un alto voltaje a este cerámico, los cables a utilizar deben ser capaces de soportar una corriente máxima de 50 [mA], magnitud de corriente entregada por el fabricante para fuente de alto voltaje utilizada (Tektronix, modelo PZD700). La fuente antes mencionada es capaz de entregar ± 700 [V] la cual se configura para entregar un voltaje positivo.

3.4 Montura de segundo espejo

La Montura del segundo espejo plano cóncavo (VLOC, modelo ROC=25 mm CC, SMC12.7-9.525-25FS-3028-671-0), que tiene iguales características al primer espejo plano cóncavo, realiza el ajuste grueso de distancia entre ambos espejos de forma de obtener la configuración confocal deseada. Por lo anterior, es fabricada una primera pieza cilíndrica de diámetro exterior 25,4 [mm] para poder ser posicionada en una montura KM100. Ésta cuenta con un hilo interior de paso fino. La segunda pieza es cilíndrica y cuenta con un hilo exterior, del mismo paso que la primera pieza, de forma de que al atornillar o desatornillar se regula su posición sobre eje óptico. Esta segunda pieza contiene el espejo plano cóncavo a regular por lo que cuenta con dos diámetros interiores. El diámetro más pequeño es para dejar pasar la luz. El segundo diámetro es más grande y es para sostener el espejo, el cual se adosa con un tornillo de apriete (prisionero) 6-32×1/8. La Fig.20 muestra las medidas de construcción de ambas piezas.

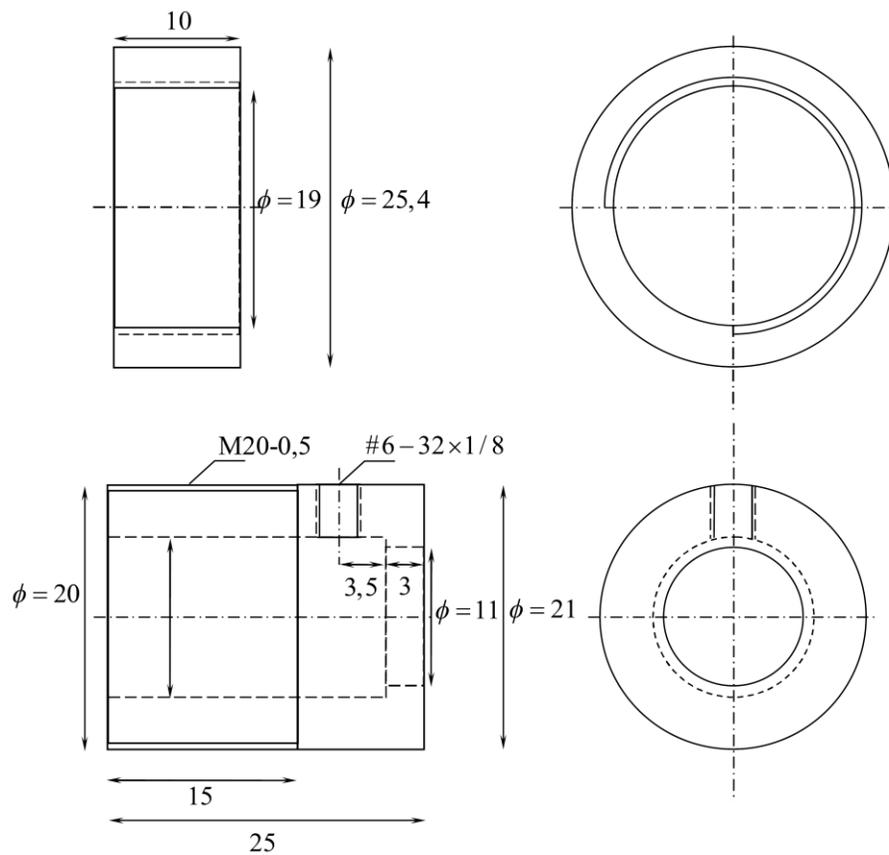


Figura 20. Vista lateral y frontal, en la parte superior de la figura, de pieza que actúa como guía para montura de segundo espejo ya que cuenta con hilo M20-0,5. La montura del segundo espejo de FPI se muestra en la parte inferior de la figura con sus vistas lateral y frontal. Ambas estructuras se muestran con sus medidas de construcción. Todas las medidas de la figura están en [mm].

3.5 Posicionamiento de estructuras y frontalidad de espejos

Para el posicionamiento frontal de precisión se colocan las estructuras en bases cinemáticas Thorlabs KM100 para objetos de sección redonda de 1" de diámetro.

Con esta montura se pueden realizar movimientos finos TIP/TILT capaces de ajustar el eje óptico. Para que ambos cilindros posicionados en sus bases KM100 respectivas

queden a la misma altura se construyeron dos cilindros de iguales dimensiones los que trabajan como bases de las monturas cinemáticas KM100. Esto último se logra maquinando dos cilindros de aluminio de 20 [mm] al mismo tiempo en el torno. Los movimientos gruesos en traslación sobre el eje óptico son realizados por las bases tipo BA2 (Thorlabs) sobre las cuales están montados los cilindros que a su vez sostienen las monturas cinemáticas KM100 que soportan las monturas de los espejos. Estas monturas BA2 son atornilladas sobre una base de duraluminio en donde se perforan 2 agujeros con hilos 1/4" X 20 para cada base BA2 de forma de que las bases queden perfectamente frontales. La base de duraluminio que sostiene los dos sistemas BA2-Cilindro-KM100, que contienen las monturas de los espejos, se fabrica previamente con las medidas e hilos para posicionar en esta dos placas frontales y una tapa en forma de "U" al final del proceso, que convierte al interferómetro en una caja negra luego de alinear el sistema. Previamente a posicionar las placas que sirven de sustento para la tapa en "U", se alineó el Interferómetro Fabry Perot mediante el láser de construcción propia de 670[nm]. Para obtener la suficiente precisión se consideró la Finesse alcanzada, característica que entrega una idea de lo bien alineado que está el FPI confocal. Esto último permite fijar el punto de entrada y salida del láser en el interferómetro por consiguiente se colocan las placas y se marca el punto de entrada en una de las placas y el punto de salida en la otra. El agujero en la placa de entrada (P1) es de 2 [mm] de diámetro para evitar efectos indeseados de difracción y para obtener una suficiente potencia de entrada, y el de la placa de salida (P2), es de 5,2 [mm] de diámetro para una buena recepción en un fotodiodo. El agujero de cada placa cumple la función de un iris o diafragma. Ambos agujeros se perforan a la misma vez, para evitar diferencias en los diámetros para luego agrandar el diámetro del agujero de salida en P2. Logrado esto último, se atornillan las placas (Fig.21 y Fig.22) en la base de duraluminio (Fig.23 y Fig.24) uniéndose al resto del sistema. Por último, la tapa en "U" (Fig.25) cierra el sistema. Un detalle en las placas es la utilización de numeración maquinada en cada una de ellas. La tapa frontal de entrada es denominada placa 1 (P1) (ver Fig.21) y la placa de salida como placa 2 (P2) (ver Fig.22). En Fig.21 hasta Fig.25, se observan las medidas utilizadas en la fabricación

de las piezas de fijación y enclaustramiento del interferómetro. En Fig.21 y Fig.22 se observan medidas de construcción de tapas tipo “T” (P1 y P2) .La Fig.23 y Fig.24 indican las vistas de la base de duraluminio que sostiene el sistema óptico del FPI con sus medidas de construcción y que sirven de base para atornillar en ella a las tapas tipo “T”. La Fig.25 muestra una vista de la tapa tipo “U” que se utiliza para cerrar el sistema. En la Fig.26 se aprecia el montaje real conseguido.

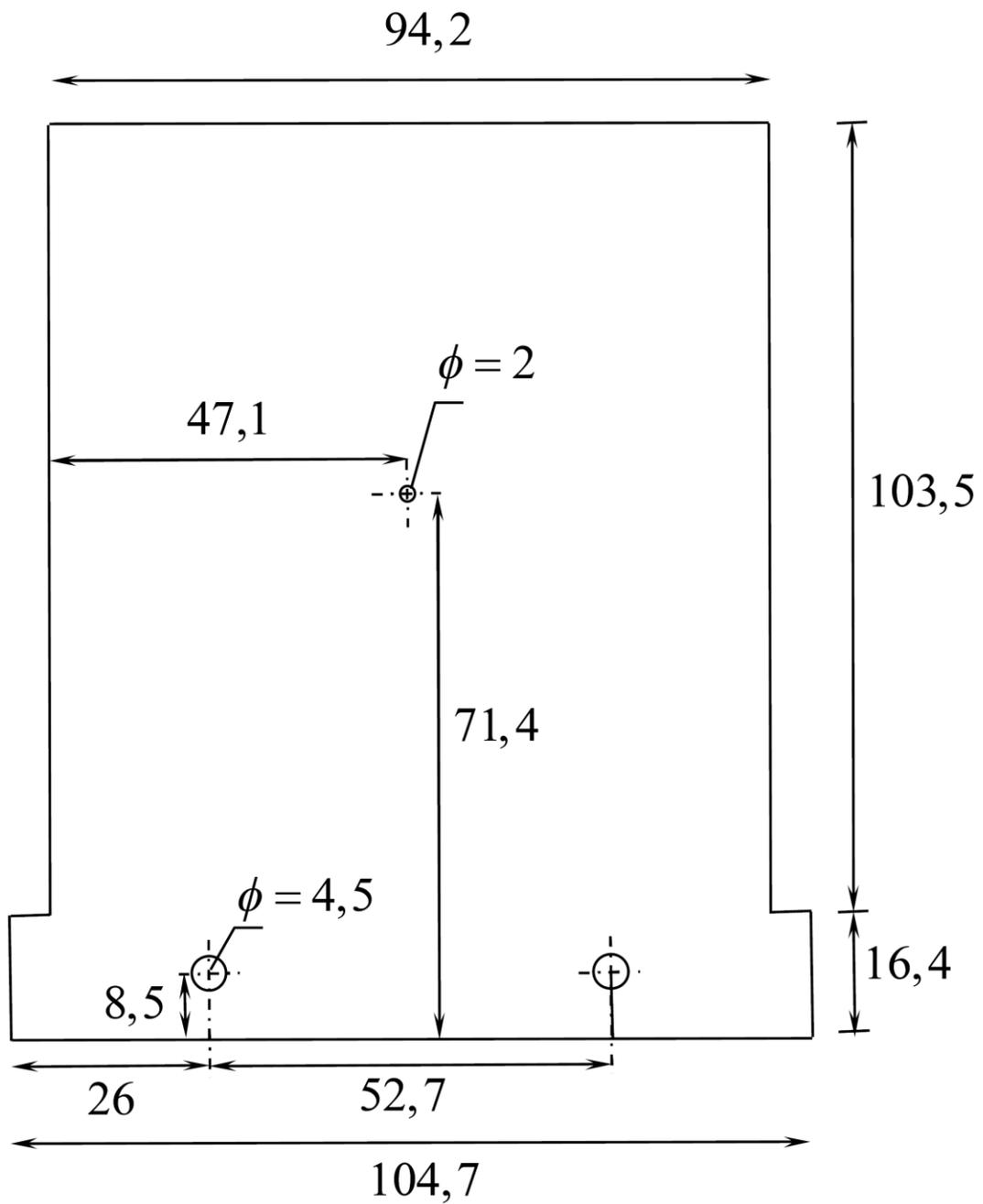


Figura 21. Vista de la placa 1. Esta es la entrada en donde ingresa el haz al interferómetro (FPI). La figura muestra sus medidas de fabricación. Todas las medidas de la figura están en [mm].

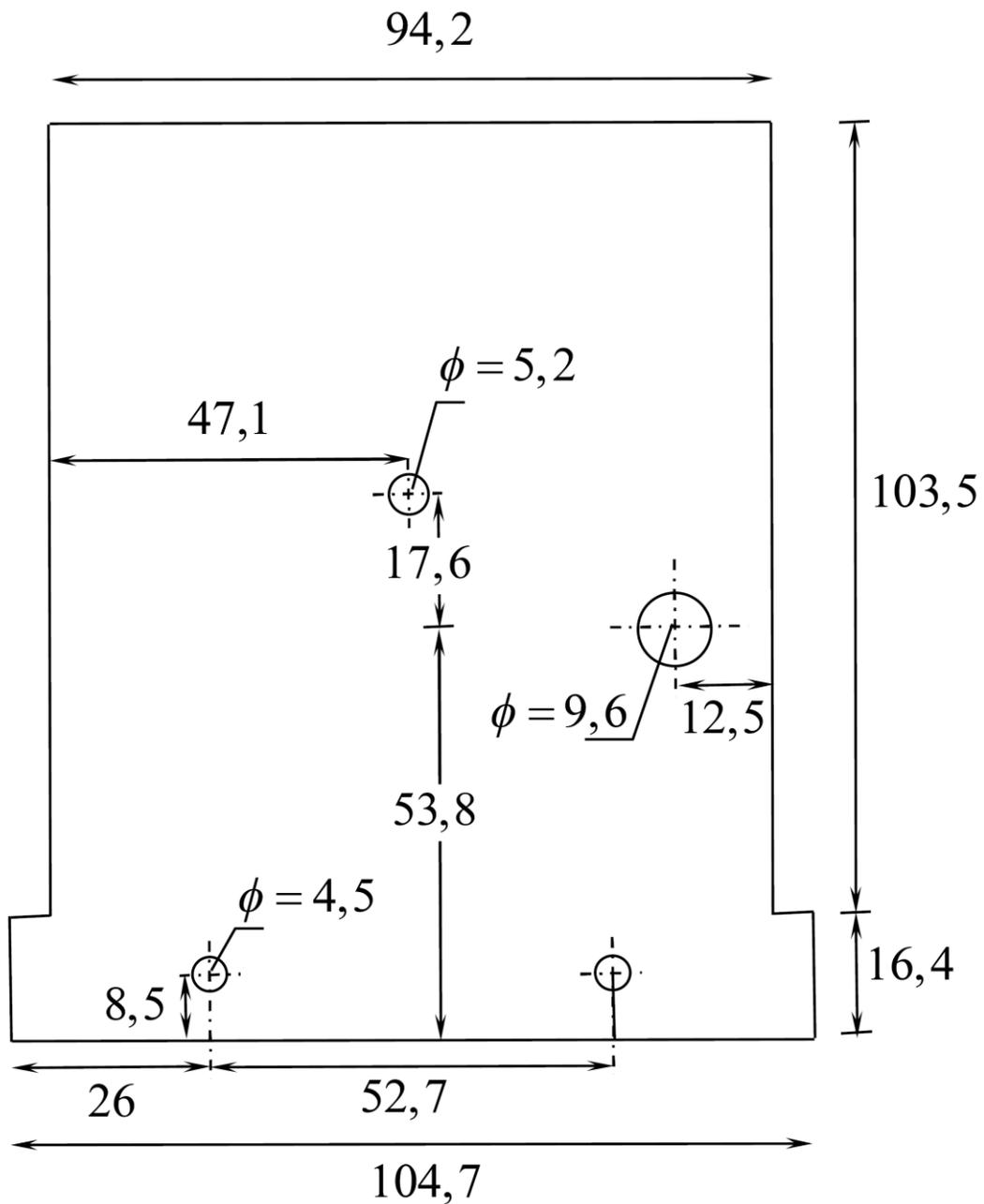


Figura 22. Vista de la placa 1. Esta es la salida del interferómetro, es por esto que cuenta con un agujero más grande que la entrada para posicionar frente de él un fotodiodo que capte la luz de salida. La figura muestra sus medidas de fabricación. Todas las medidas de la figura están en [mm].

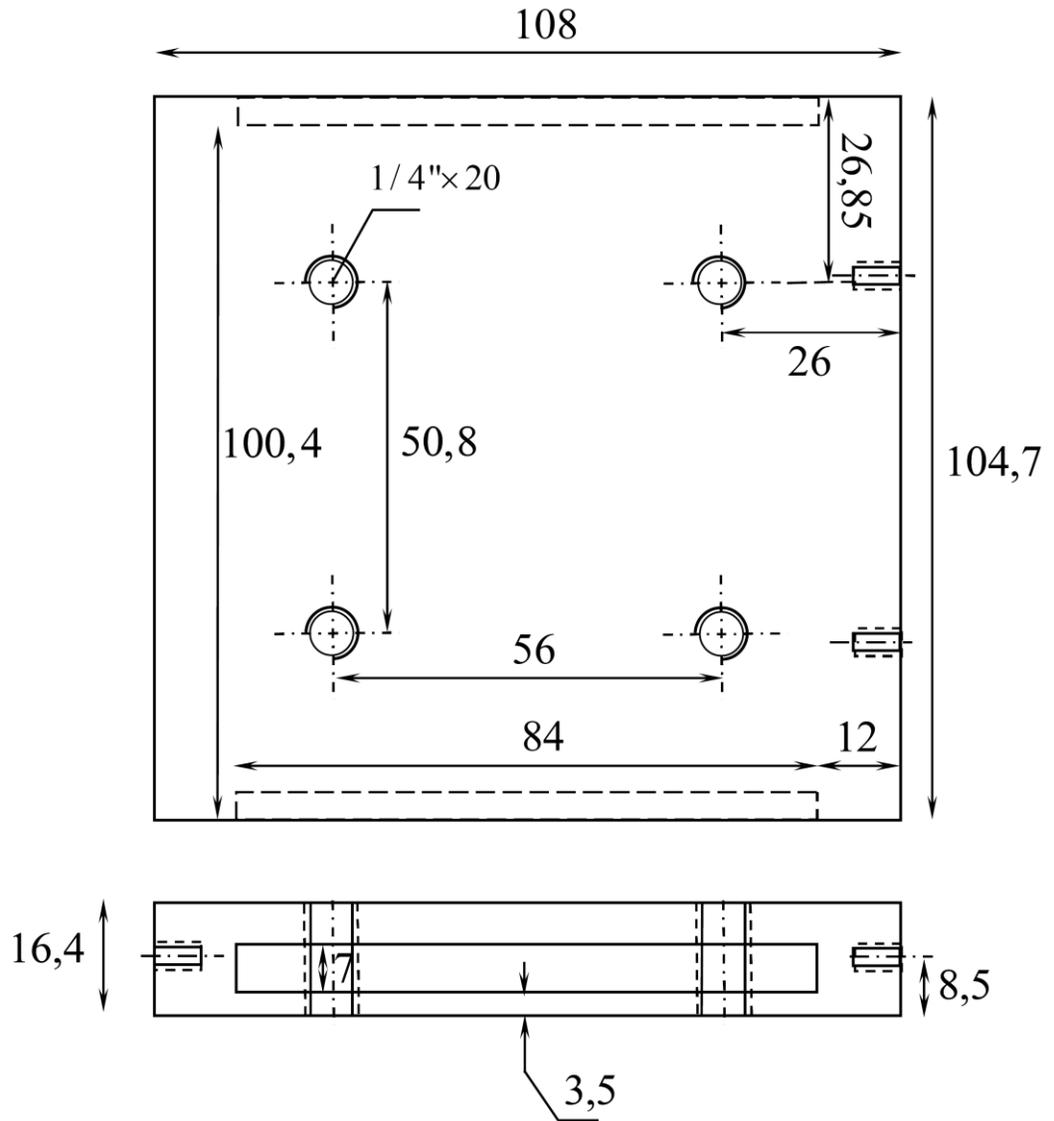


Figura 23. Vista superior y lateral más ancha de la base del interferómetro. Esta base cuenta con las medidas de todos los agujeros que permiten soportar las placas o tapas en forma de “T” y la tapa en “U” que posteriormente cierra el sistema. Además cuenta con dos acanalados para fijar esta base sobre un banco óptico. Todas las medidas de la figura están en [mm].

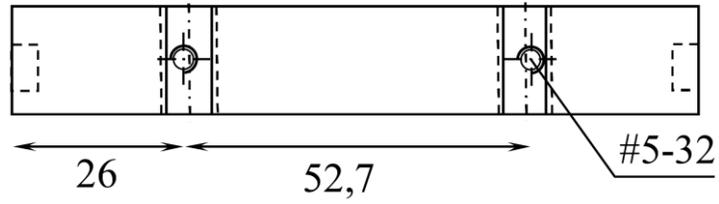


Figura 24. Vista complementaria de la base del interferómetro. Ésta, es la vista lateral más angosta de la base y entrega información acerca de sus medidas de construcción todas en [mm].

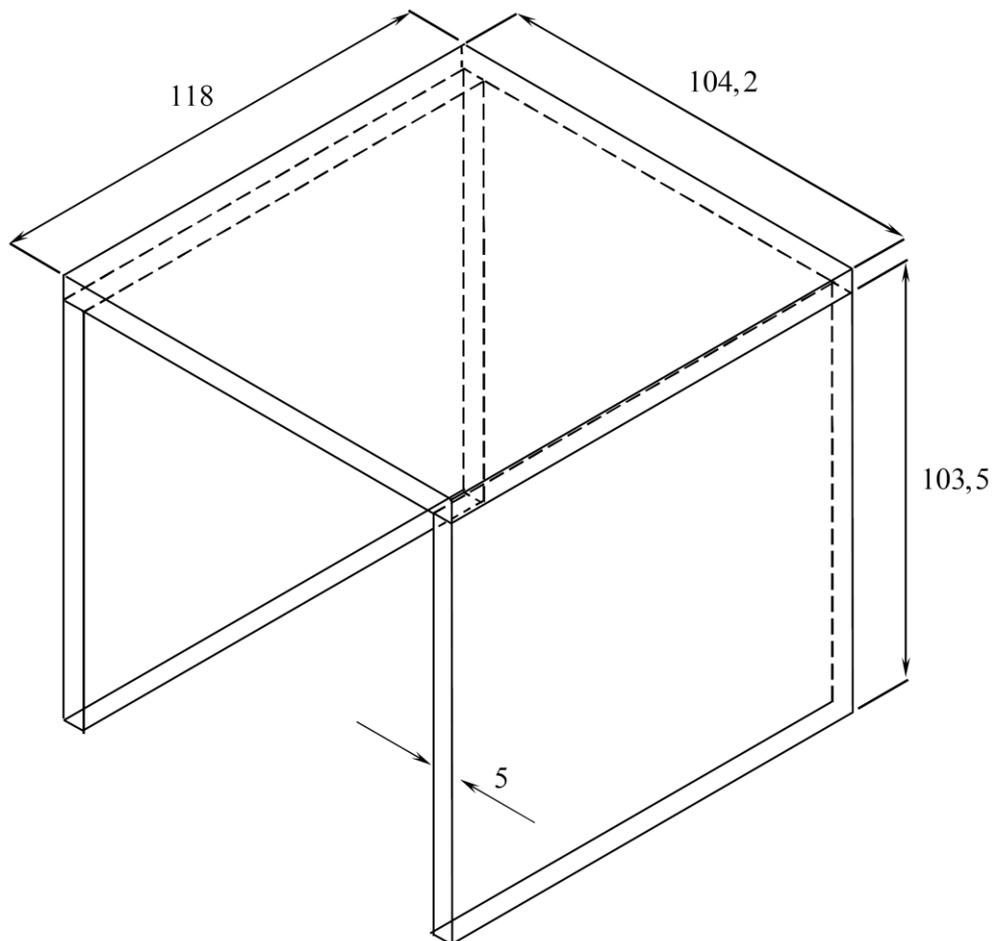
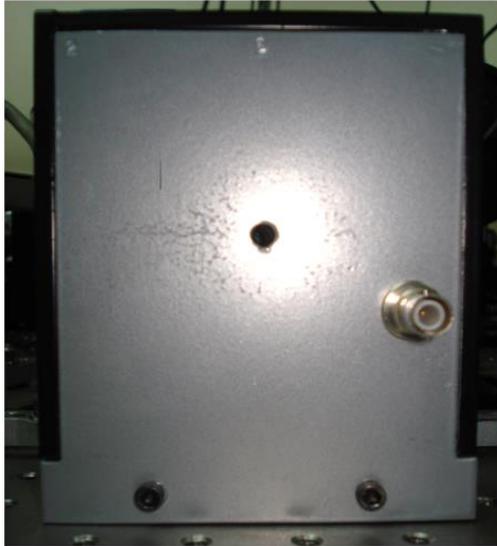
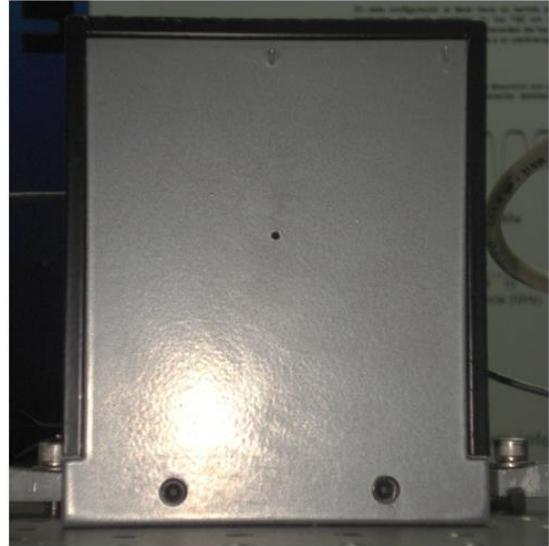


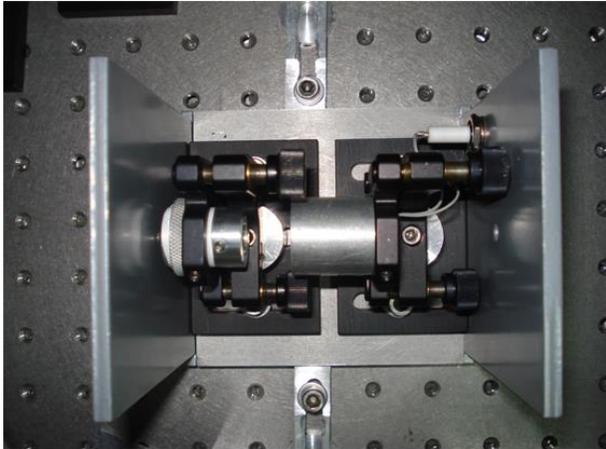
Figura 25. Medidas y grosor de 5 [mm] de las tres placas de aluminio con que se construye la tapa tipo “U” para el interferómetro Fabry Perot. Todas las medidas de la figura están en [mm].



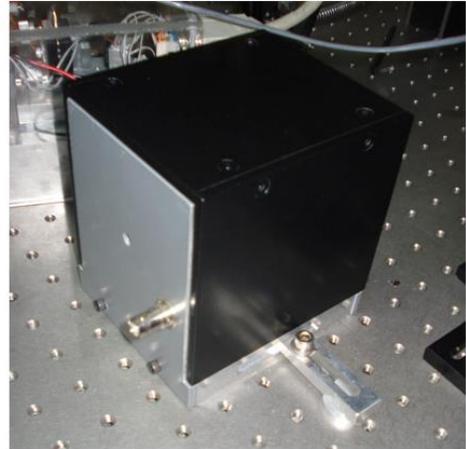
a)



b)



c)



d)

Figura 26. La imagen a) muestra la parte posterior del FPI, lugar en donde se posiciona el fotodiodo. Además se aprecia la conexión BNC de alto voltaje utilizada en el interferómetro. En b) se muestra la entrada 2 [mm] del FPI. En c) se observa una vista superior e interior del montaje del interferómetro en donde se identifican la montura del espejo 1 y la del espejo 2 que regula de manera gruesa la distancia. En d) se aprecia una vista panorámica del FPI terminado y adosado al banco óptico.

3.6 Cálculo de la Finesse y FSR del interferómetro confocal de construcción propia.

Es necesario caracterizar el FPI confocal construido en el laboratorio calculando la Finesse máxima que se puede conseguir como también su rango espectral libre (FSR). Para realizar el cálculo se debe considerar que el FPI confocal está construido con espejos plano cóncavos de reflectividad $R=99,5\%$ y un radio de curvatura $ROC= 25$ [mm] y reemplazarlas en las Ec.10 y Ec.11 correspondientes al rango espectral libre y Finesse respectivamente para un interferómetro Fabry Perot confocal.

$$FSR = \frac{c}{4L} = \frac{3 \cdot 10^8 [m/s]}{4 \cdot 25 \cdot 10^{-3} [m]} = 3 [GHz] \quad (10)$$

$$Finesse = \frac{FRS}{FWHM} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R} = \frac{\pi \cdot \sqrt{0,995}}{1-0,995} = 626,7458 \quad (11)$$

Las Ec.10 muestra un rango espectral $FSR= 3$ [GHz] para el interferómetro construido determinado por el radio de curvatura de los espejos utilizados en la fabricación y la configuración confocal que se le da. La Ec.11 muestra una Finesse máxima teórica de 626,7458, número adimensional que se consigue de la perfecta alineación de este sistema óptico lo cual implica que toda la luz que ingresa está interfiriendo en el interior del FPI confocal construido.

3.7 Construcción de láser de diodo sintonizable con cavidad Littrow

La construcción de un láser sintonizable en el laboratorio tuvo por finalidad lograr un láser con la suficiente capacidad de sintonización, es decir, que tenga una sensibilidad en

sus variación de una centésima de [nm] y que el láser funcione unimodalmente, sin saltos de modo que quiten estabilidad al sistema. La construcción del láser se hace en base al modelo de Steinbach and Wieman (ref.[1]) a la cual se le hacen modificaciones importantes. Una Sinopsis de componentes comienza por la descripción del diseño de bases y monturas para diodo láser y formación de cavidad Littrow. La construcción del láser, cuenta con una parte gruesa, en donde se fabrican las piezas de aluminio que dan sustento a los sistemas ópticos. Se fabrican 2 grandes bloques de duraluminio. El primer bloque y más grande, esta dirigido a aislar el sistema de la estática que pudiera descargarse hacia el diodo láser y en cierta cantidad no importante, para aislar la temperatura del banco óptico del sistema. Esto último no es demasiado relevante ya que se usó un Peltier (Melcor, modelo CP1.4-127-045L-1-W6) para el control de temperatura del sistema, pero si se debe considerar que el bloque más grande actúa como sumidero del calor generado por una de las caras del Peltier. El segundo bloque, más pequeño y delgado, es el que sustenta de forma directa a los sistemas ópticos, es decir, sustentación de diodo láser y cavidad Littrow. Entre los dos bloques de aluminio se inserta un Peltier para mantener al sistema con un buen manejo de la temperatura. La cara del Peltier que enfría, esta puesta hacia el bloque más pequeño, y la cara que esta a mayor temperatura, hacia el bloque más grande. Ahora, para que estas tres partes se puedan acoplar con seguridad, tanto el bloque grande como el pequeño, tienen 3 agujeros que son coincidentes de manera de apretar entre ellos al Peltier. Para esto, el bloque grande contiene los 3 agujeros pasados, en donde además se coloca un cilindro de PVC (aislante) para que el tornillo que une a los dos bloques no tenga contacto con posible estática que pudiera traspasar desde el bloque grande hasta el pequeño, evitando así una descarga hacia el diodo láser. Por su parte, el bloque más pequeño cuenta con 3 agujeros con hilo, de forma de introducir estos tornillos desde abajo (desde bloque grande) hasta arriba (hasta bloque pequeño). Se debe hacer notar que el Peltier debe tener buen contacto térmico con ambos bloques por lo que al momento de posicionarlo se coloca una pasta térmica en ambas caras de él. Una sinopsis grafica de las piezas mencionadas se puede observar desde la Fig.27 hasta la Fig.31.

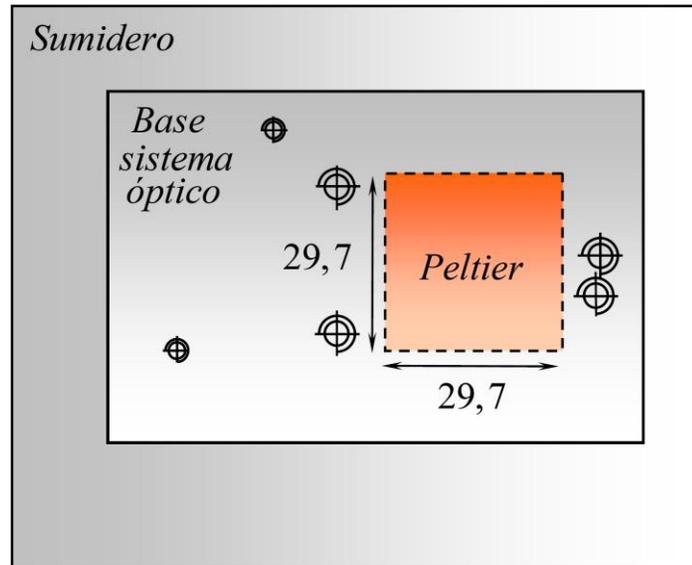


Figura 27. Posicionamiento de los dos bloques del sistema láser. El bloque mayor que actúa de sumidero y el bloque pequeño, por encima de él, que actúa de soporte de todo el sistema óptico en configuración Littrow. Entre ellos se observa el posicionamiento del Peltier que permite el control de la temperatura del sistema, y con esto, su aporte a la estabilidad de la emisión del diodo láser. Todas las medidas de la figura están en [mm].

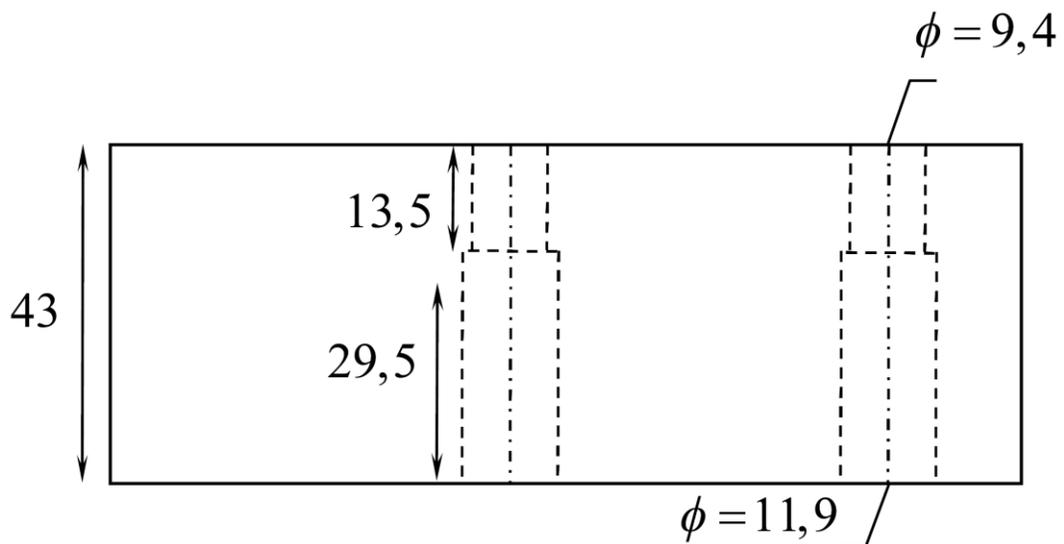


Figura 28. Vista lateral del bloque mayor que actúa de sumidero junto a sus medidas de construcción. Todas las medidas de la figura están en [mm].

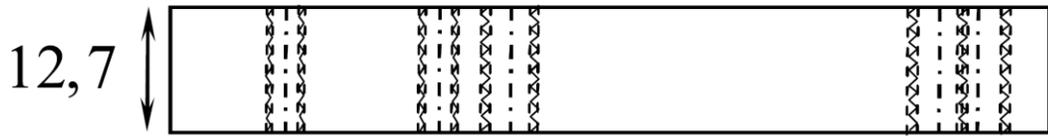


Figura 29. Vista lateral del bloque menor o pequeño que soporta el sistema óptico en configuración Littrow junto a sus medidas de construcción. Todas las medidas de la figura están en [mm].

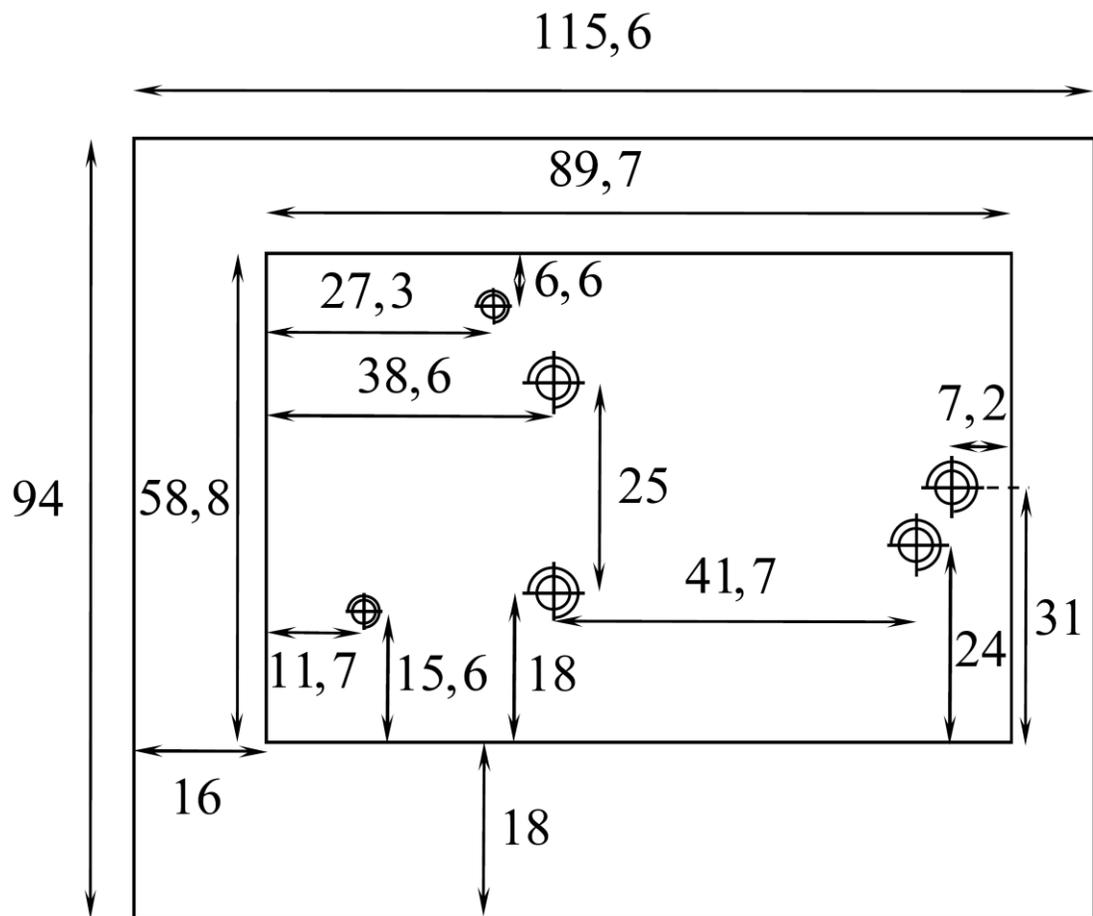


Figura 30. Vista superior del sistema láser construido. Se aprecia el posicionamiento de los 2 bloques del sistema láser y sus respectivas medidas de construcción. Estos bloques son el bloque mayor que actúa de sumidero de temperatura y el bloque pequeño que soporta el sistema óptico en configuración Littrow. Todas las medidas de la figura están en [mm].

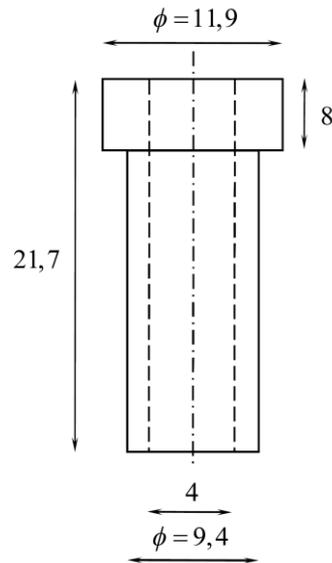


Figura 31. Diseño del aislante de PVC que se coloca para la aislación del tornillo del bloque mayor junto a sus medidas de construcción. El aislante de PVC está diseñado para tornillo #8-32 1 ½” que permite ensamblar a bloque pequeño con el bloque grande en el sistema láser construido. Todas las medidas de la figura están en [mm].

Por su parte, bloque más pequeño contiene el sistema óptico, por lo que cuenta con un agujero cerca de uno de sus bordes para posicionar la montura KMS (Thorlabs). A esta montura se le atornilla una L de aluminio con un “acanalado” para que sea capaz de moverse de forma gruesa al momento de alinear y así también variar la longitud de la cavidad externa como es posible ver en Fig.32 y Fig.33 que muestran los elementos mecánicos fabricados para la configuración óptica tipo Littrow, su secuencia de ensamble y sus medidas de construcción. Esta Montura KMS (Thorlabs) está destinada para posicionar una montura tipo “U” que a la vez sostiene la red de difracción. Es por esto que se fabricó una montura en forma de “U” en donde quepa la red y se atornille a la montura. Este diseño de montura tipo “U” se puede observar con su vista frontal en la Fig.32, a la derecha de la montura KMS, y en la Fig.33 en su vista lateral. Como complemento a información detallada en la Fig.32, se detalla en la Fig.33 la altura del agujero con “avellanado” para tornillo que une a montura tipo “U” (que sostiene a la red de difracción del sistema óptico) con montura KMS .

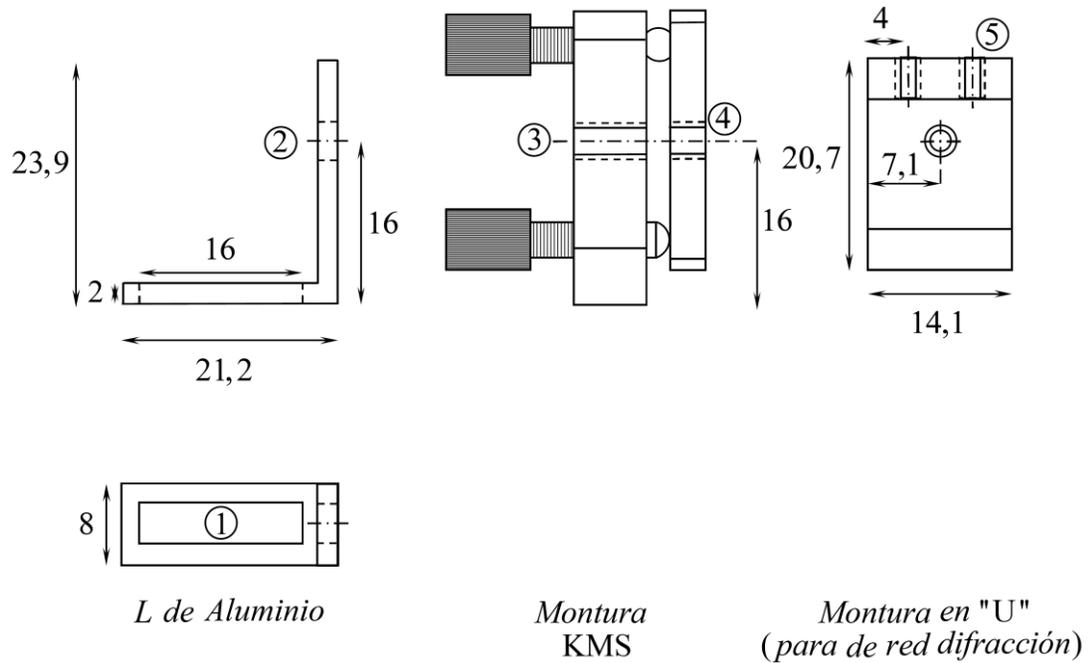


Figura 32. Sistema opto-mecánico cavidad Littrow para Láser. Todas las medidas de la figura están en [mm].

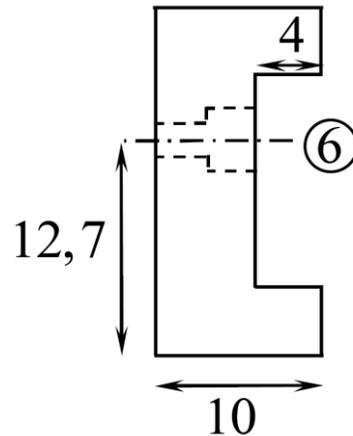


Figura 33. Información complementaria acerca de la altura de fabricación del agujero con avellanado para la montura en "U" que permite la inserción de un tornillo de sujeción a la montura KMS de medida #4-40. La fabricación de este agujero esta denominado con el número 6 siguiendo la secuencia de definición de la Fig.32, esto permite, indicar las características más detalladamente en lectura principal. Todas las medidas de la figura están en [mm].

En la Fig.32 y en la Fig.33, los números representan los agujeros y sacados de las piezas. Los números han sido puestos para indicar sus características por lo que en Fig.32 el número (1) indica acanalado en la pieza con forma de “L”, el cual tiene el diámetro para colocar un tornillo #8-32 (M4). El número (2) es un agujero pasado para un tornillo #8-32 (M4). El número (3) indica el agujero para posicionar la montura con la “L”. Este agujero tiene hilo para tornillo #8-32 (M4). El (4) es para posicionar algún objeto por el sector frontal, en este caso, la montura en “U” que sostiene a la red de difracción. Su hilo es #4-40. Indicador (5) señala a los dos tornillos que se hacen en la parte superior de la montura en “U” que tiene un hilo tipo #6-32 \times 1/8 para aprisionar red de difracción. Finalmente, en la Fig.33, el agujero (6) es un agujero que está fabricado para un tornillo exactamente igual que el del punto (4). Hay que consignar que a la pieza en “U” se le debe hacer un “avellanado” para que la cabeza del tornillo no moleste al momento de posicionar la red de difracción. Luego, en la base pequeña fabricada para montar directamente los elementos ópticos anteriores, se hacen dos pequeños agujeros con hilo (M3 \times 0,5). Estos agujeros están distanciados de manera de soportar una base de aluminio en forma de “T” con un agujero en su parte central. Esta base está frente a montura KMS, que sostiene a red de difracción y tiene un ángulo aproximado de $\alpha = 23,74^\circ$ respecto a ella, ángulo determinado por la red de difracción de 1200[líneas/mm] usada y la longitud de onda entorno a $\lambda = 670$ [nm] de los diodos utilizados (el cálculo de α se observa en Ec.11). Un esquema de la base pequeña que contiene los elementos ópticos, se puede ver en Fig.34.

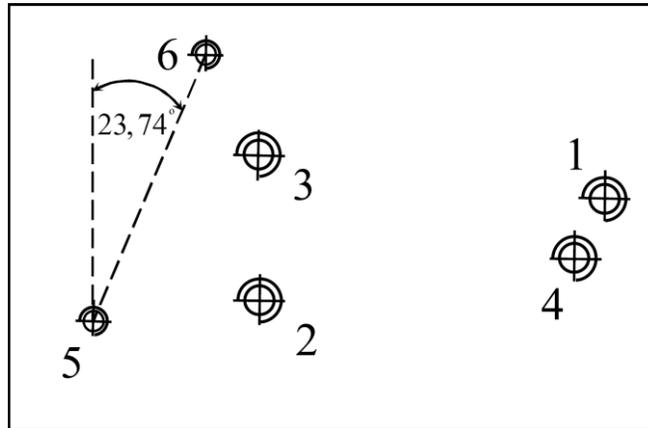


Figura 34. Vista Superior de base pequeña que contiene sistema óptico

En la Fig.34 los indicadores 1,2 y 3 son hilos coincidentes para tornillo tipo #8-32 \times 1/2” que une a la base pequeña mostrada en la Fig.34 y la base sumidero (base grande). Agujeros 5 y 6 son hilos M3 \times 0,5 para enganchar base en forma de “T” que sostiene una montura cilíndrica que contiene el diodo láser, de tal manera, que formen 23,74° respecto a red de difracción. El indicador 4 es un agujero con hilo #8-32 (M4) para atornillar “L” que sustenta a base KMS, que a su vez, soporta la montura tipo “U” que sostiene a la red de difracción. La base tipo “T” se fabrica dos veces, con dos medidas diferentes, lo que significa, que se probaron dos diseños distintos. Cada diseño está determinado por el tipo de cilindro que sostiene. Cada cilindro es el responsable de sostener el sistema óptico socket-diodo láser- lente esférico. Se contó con un cilindro de fabricación propia y un cilindro comercial LT230P-B, por lo cual, se fabricaron dos distintas bases tipo “T”, como se observa en las Fig. 35 y Fig.38 pero finalmente se decidió trabajar con La base tipo “T” de la Fig.38, diseñada para soportar un cilindro LT230P-B (Thorlabs), por su estabilidad mecánica y reducido tamaño. A cada base tipo “T” se le hizo una perforación en su parte superior para posicionar un termistor TH10K que se conectó al controlador de temperatura TED 200 (Thorlabs).

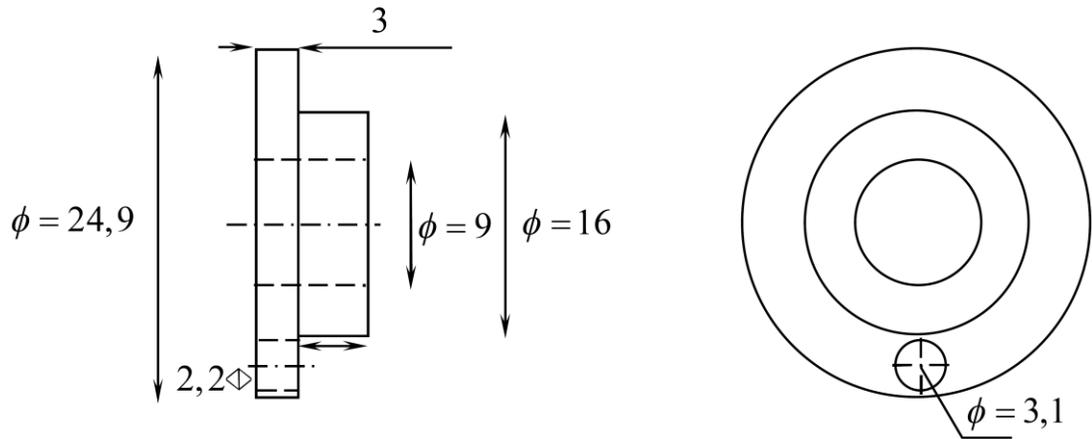


Figura 37. Vista lateral y frontal de tapa de cilindro de fabricación propia. Esta tapa es atornillada al cilindro con el fin de sostener y centrar el socket (Thorlabs, modelo S8060) que se conecta al diodo láser, y a la vez , circunscribir y centrar al diodo láser en el cuerpo cilíndrico. Su posición y atornillado en el cilindro principal es en la parte posterior de éste. La parte posterior del cilindro es el extremo izquierdo de la Fig.36. Todas las medidas de la figura están en [mm].

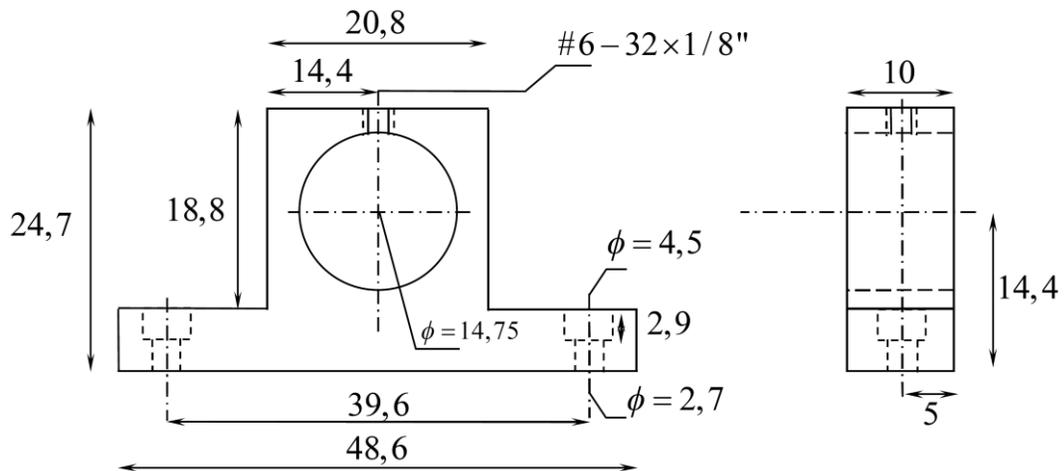


Figura 38. Vista frontal y lateral de base tipo “T” de fabricación propia junto a medidas de construcción .Su diseño esta realizado para que sostenga un tubo LT230P-B capaz de sostener un lente esférico de $f=4,5$ [mm] y diodos de 5,6 y 9 [mm]. Todas las medidas de la figura están en [mm]. Agujero para TH10K no se representa en la figura.

El primer diseño de la base tipo “T”, observable en la Fig.35, permitió posicionar un cilindro de fabricación propia, observable en la Fig.36, que contiene el diodo láser. A la base tipo “T” de la Fig.35 se le hizo una perforación en su parte superior para posicionar un termistor TH10K que se conectó al controlador de temperatura TED 200 (Thorlabs). En la Fig.36 se observa el cuerpo principal del cilindro de fabricación propia. Este soporta un sistema óptico compuesto por cualquier diodo láser de 9 [mm] de diámetro y un lente esférico $f = 4,5$ [mm] (Thorlabs, modelo C230TM) delante del diodo láser. A este lente se le puede ajustar su distancia respecto al diodo pues la estructura cuenta con un hilo interior $M9 \times 0,5$ para poder hacerlo. En el experimento el diodo utilizado en este cilindro fue un HL6714G (Hitachi). Lo anteriormente descrito se distribuye de izquierda a derecha en la imagen. Además, el cilindro anteriormente mencionado, cuenta con un tapa atornillable, en Fig.37, que cierra su parte posterior, y que, una vez atornillada, sostiene y centra la posición del socket que va conectado al diodo láser usado, con lo que al mismo tiempo, centra al diodo láser en la pieza cilíndrica. Esta tapa esta fabricada para sostener un socket S8060 (Thorlabs) para diodo láser de 9 [mm]. El segundo diseño de base tipo “T”, en Fig.38, tiene un diámetro para probar un cilindro LT230P-B (Thorlabs). Este cilindro tiene la característica de soportar diodos estándar de 9[mm] y de 5,6 [mm] ya que trae anillos de retención para ambas medidas como también soporta un lente esférico de $f = 4,5$ [mm] (Thorlabs, modelo C230TM) al que se le puede regular su distancia respecto al diodo láser. A la base tipo “T” de la Fig.38 se le hizo una perforación en su parte superior para posicionar un termistor TH10K que se conectó al controlador de temperatura TED 200 (Thorlabs). Ambos diseños fueron probados, pero se decidió trabajar incorporando en forma permanente y definitiva en el sistema láser, el segundo diseño de base tipo “T” con un cilindro LT230P-B ya que esta configuración es mucho más pequeña que utilizar el primer diseño de base tipo “T” con el cilindro de fabricación propia. Además se decidió trabajar en forma definitiva, después de pruebas de ajuste, con el diodo láser TOLD 9221M dentro del cilindro LT230P-B.

3.8 Sellado de sistema láser

El sistema láser debe ser sellado de forma que, las corrientes de aire o flujos de calor de sistemas externos hacia el, no afecten. El sellado se realizó mediante una carcasa de acrílico tipo “U” que se sustenta sobre dos placas rectangulares colocadas a los costados más angostos de la base grande de duraluminio (sumidero) del sistema láser, a la cual, se le hacen 2 perforaciones con hilo a cada lado para sujetar tales placas. Por otro lado, las placas mencionadas, cumplen la función de soportar circuitos eléctricos y conexiones propias del sistema láser. Es así que se denomina placa 1 (P1) a la que soporta el circuito de protección de corriente para el diodo láser, la conexión de 9 pines (hembra) para controlador de corriente de diodo láser LDC205 (Thorlabs) y el agujero de salida de la luz. La placa 2 (P2) se denomina a la placa que soporta la conexión de 9 pines (macho) para el controlador de temperatura TED 200 (Thorlabs) y una conexión BNC para la señal de entrada que origina el movimiento de barrido del piezoeléctrico del sistema láser.

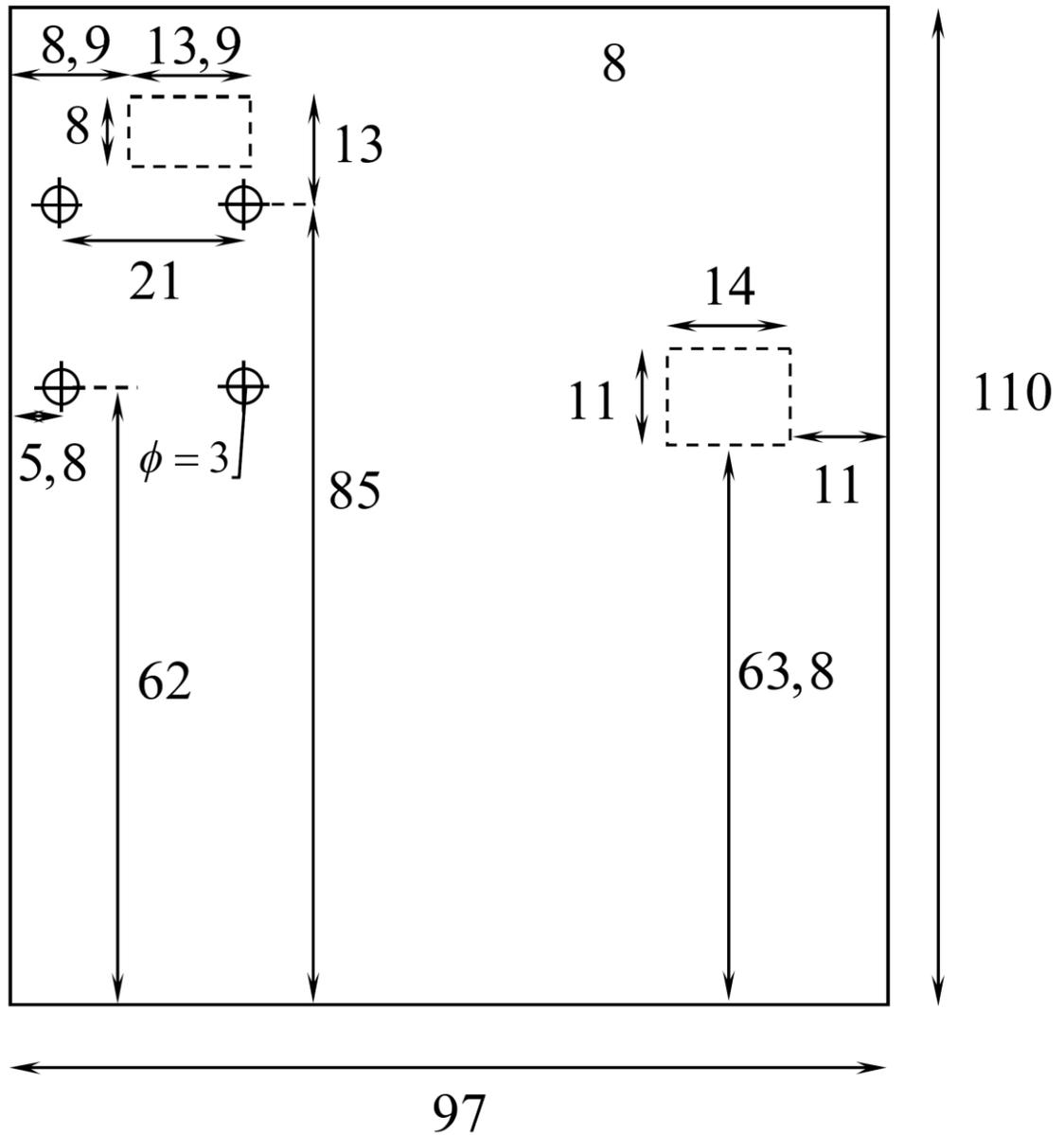


Figura 39. Placa 1 (P1) soporta mediante cuatro perforaciones de 3 [mm] el circuito de protección de corriente del diodo láser. Además cuenta con dos perforaciones rectangulares. La perforación rectangular más elevada en la figura indica el punto donde se posiciona la conexión para el controlador de corriente del diodo láser LDC205 (Thorlabs). La perforación rectangular más baja en la figura indica el punto de salida del haz láser. Todas las medidas de la figura están en [mm].

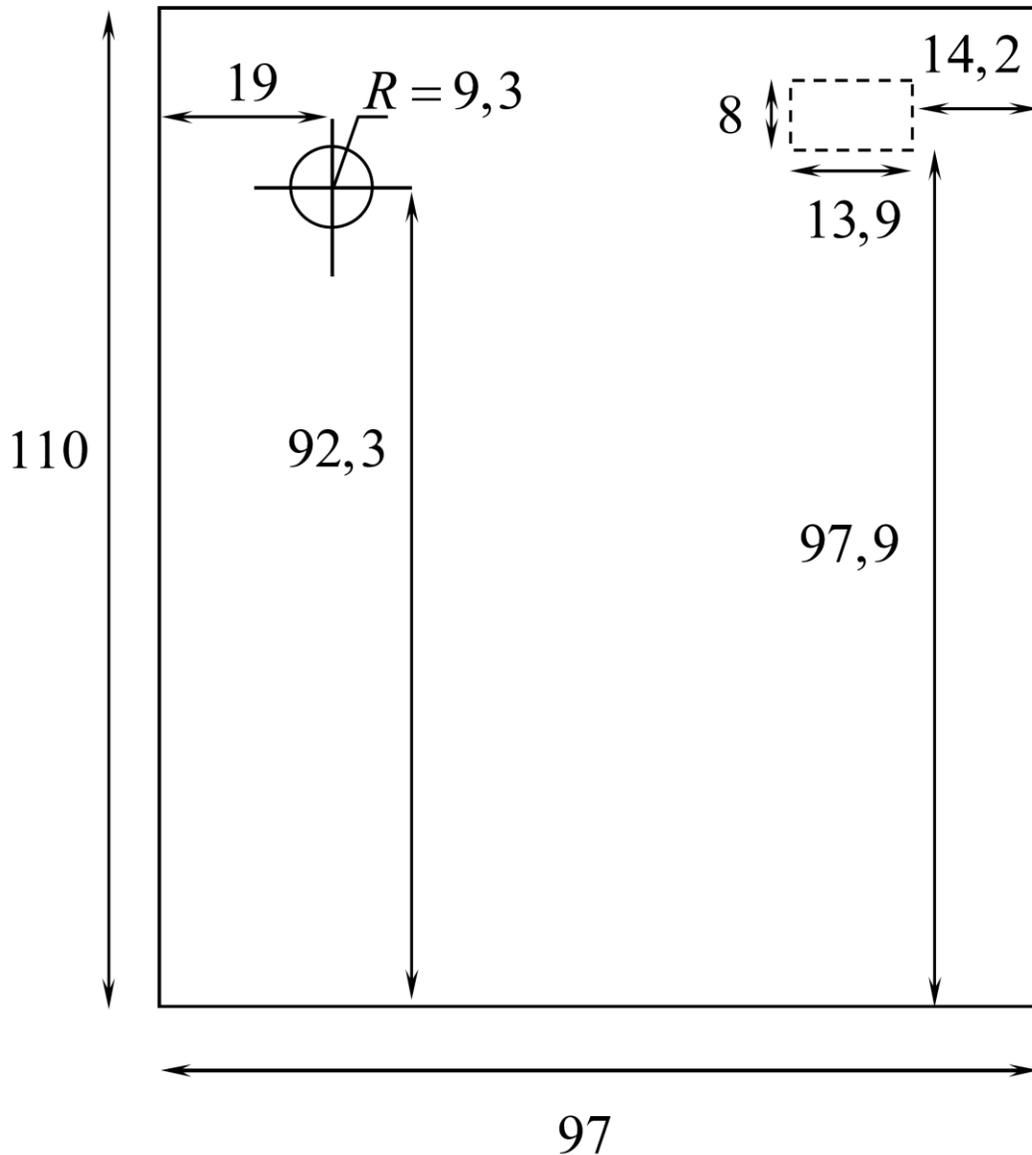


Figura 40. Placa 2 (P2) cuenta con perforación para conector tipo BNC para entrada de señal de barrido de piezoeléctrico, y una perforación rectangular, para posicionamiento de conector de 9 pines (macho) correspondiente al controlador de temperatura TED 200 (Thorlabs) del sistema láser. Todas las medidas de la figura están en [mm].

La placa 1, en la Fig.39, esta destinada, además de aportar al sellado del sistema láser, a soportar también el circuito de protección de corriente para el diodo láser, la conexión de 9 pines (hembra) del controlador de corriente LDC205 (Thorlabs) del diodo láser,

además de contener el agujero de salida del haz láser. Es por esto que cuenta con 4 agujeros pasados, de 3 [mm] de diámetro, para sostener el circuito de protección de corriente y una perforación superior con la forma del conector de 9 pines (hembra) del controlador de corriente. La placa 2 (P2), en Fig.40, tiene una perforación para colocar el conector tipo BNC para la entrada de la señal de barrido para piezoeléctrico y una perforación rectangular para posicionar la conexión de 9 pines (macho) correspondiente al controlador de temperatura TED 200 (Thorlabs) del sistema láser. Ambas placas servirán, por último, de rieles para la estructura de acrílico tipo “U” que termina de enclaustrar al sistema. Esta estructura de acrílico consta de dos placas, como las que se pueden observar en Fig.41, que son de igual medida y con acanalados en los costados para funcionar como rieles, y una última placa, como se ve en Fig.42, con distintas dimensiones que funciona como la parte superior de una carcasa en “U”. Al pegar las tres tapas con epoxi, esta forma una “U”.

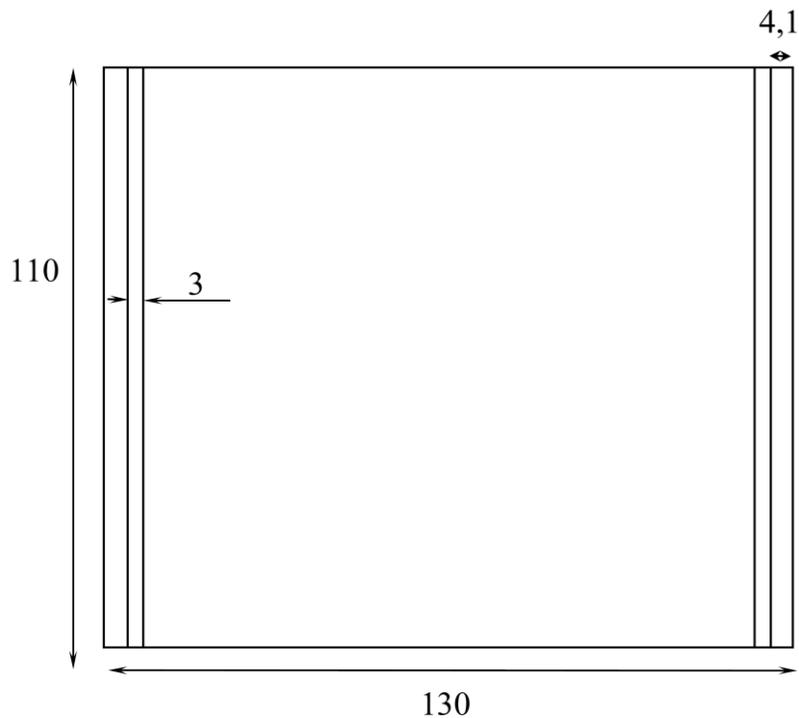


Figura 41. Placa lateral de acrílico para tipo tipo “U” para sellado de sistema láser. Se fabrican dos de estos modelos y se unen a la placa superior de la Fig.42. Todas las medidas de la figura están en [mm].

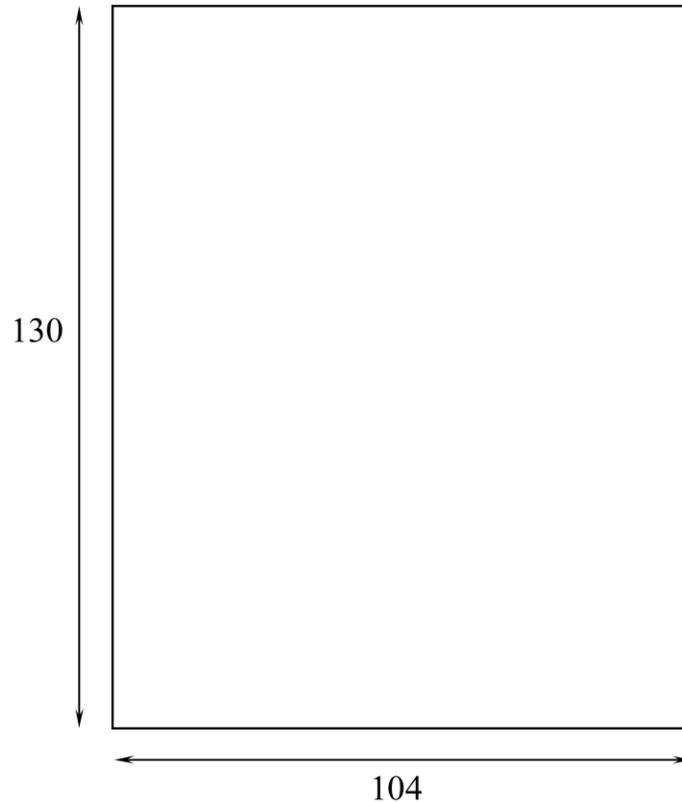


Figura 42. Placa superior para tapa tipo “U” de acrílico para sellado de sistema láser. Todas las medidas de la figura están en [mm].

3.9 Determinación de la red de difracción para la cavidad Littrow y sus consecuencias

Cuando se hace incidir un haz sobre una red de difracción (Thorlabs, modelo GR13-1208) como la que se usó en la construcción de la cavidad Littrow, la red envía distintos órdenes de difracción en distintas direcciones. Dependiendo de la longitud incidente, el ángulo de salida queda definido. La red escogida esta fabricada para longitudes de onda entorno a los 750 [nm], esto hace, que el orden de difracción cero y primer orden de difracción encuentren un ángulo distinto de salida que se debe calcular al momento de utilizar la red. El cálculo se debe realizar para cuando sobre esta red incida una longitud de onda de 670 [nm] utilizando la Ec.5. El ángulo que se calcula para esta red define el

ángulo α en el que se posiciona la estructura que sostiene a la fuente de luz que es el diodo láser respecto a la red. Antes de escoger dicha red de difracción se evaluó y calculó que sucede con redes de 1200 [líneas/mm] de distintas configuraciones de tamaño y para distintas longitudes de onda. Comercialmente se venden redes de difracción cuadrada y rectangular. Por lo anterior, se escoge una red de 1200 [líneas/mm] con una distancia entre líneas $d = 8,3 \cdot 10^{-7}$ [m], y mediante el despeje de α , realizado desde la Ec.5, el ángulo α de salida para el orden $m=1$ es de $23,74^\circ$ para una longitud de onda $\lambda = 670$ [nm], mostrado en Ec.11. De acuerdo este cálculo, el resultado de usar esta red de difracción en el sistema láser se observa en la Fig.43.

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{2d} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1 \cdot 670 \cdot 10^{-9} \text{ [m]}}{2 \cdot 8,3 \cdot 10^{-7} \text{ [m]}} \right) = 23,74^\circ \quad (12)$$

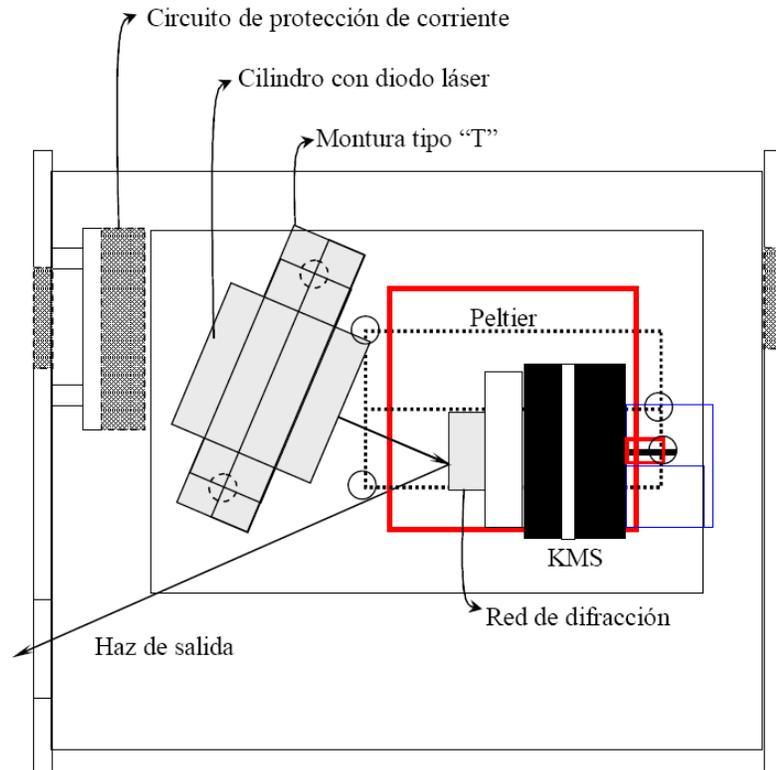


Figura 43. Vista superior del láser con las piezas básicas montada. Se observa la salida del haz al escoger una red de difracción de 1200 [líneas/mm] para longitudes de onda entorno a los 750 [nm]. Al usar esta red con $\lambda = 670$ [nm], se define un ángulo $\alpha = 23,74^\circ$ entre la red y la salida de la luz.

3.10 Sistema de protección de corriente para diodo láser y cuidados en su manejo.

El sistema láser consta de un circuito de protección contra excesos de corriente que puedan entrar al láser. Se debe tener bastante cuidado en el manejo de láseres de diodo para evitar descargas. Normalmente los láseres pueden venir con instrucciones de usos que se deben seguir. En estas instrucciones se suelen mencionar también que una manera efectiva de proteger al láser es conectándole un diodo protector de polarización inversa. Este diodo protege contra picos de tensión los cuales pueden superar los pocos voltios de vuelta que un diodo láser puede tolerar. Por lo anterior, y considerando el trabajo de

Mc Adam, Steinbach and Wieman (ref[1]), se construye un circuito de protección para el diodo láser ,por el cual ,aseguran los autores, el diodo láser incrementa sustancialmente su tiempo de vida. La figura demostrativa del circuito de protección del diodo láser se puede apreciar en Fig.44.

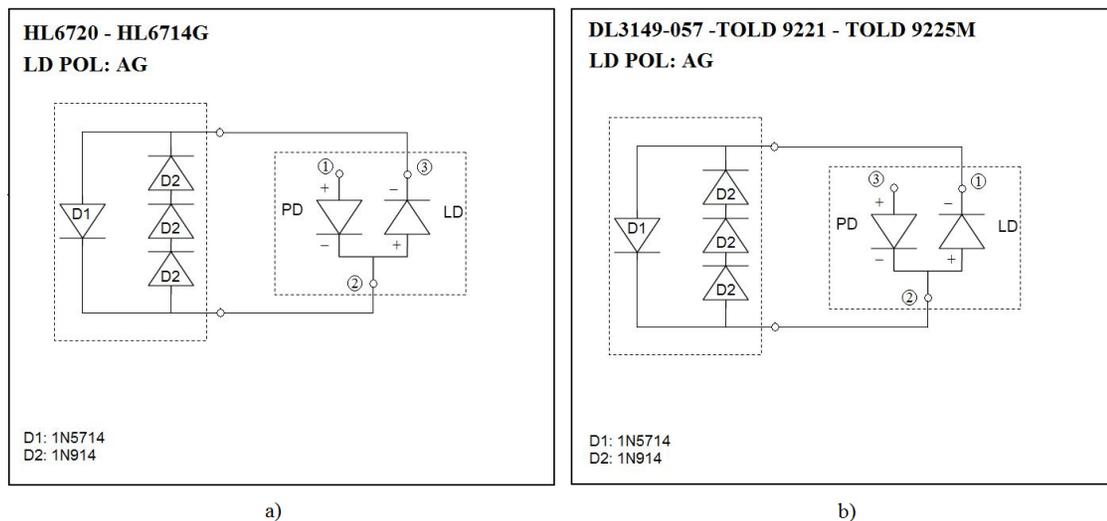


Figura 44. Circuito de protección para diodo láser y la conexión de este con distintos tipos de diodo con la misma configuración y polaridad AG. En a) se muestran los mismos tipos de conexiones que para b) pues existe el mismo tipo de polaridad para todos los casos, sólo cambia, la configuración física de los terminales de los diodos utilizados en cada uno de los casos, que son detallados en las figuras.

En la Fig.44 se muestran dos imágenes que contienen la configuración y componentes del circuito de protección y el tipo de conexión que se hace de éste con distintos diodos láser. La a) muestra en su parte superior un listado de diodos con la misma configuración física y polarización según fabricante y debajo se observa el circuito y la conexión con ellos. Todos emiten entorno a la frecuencia de las líneas de absorción del litio. En la b), se muestra el mismo esquema de conexiones, pero los diodos láser presentados en su parte superior indican otros tipos de configuración de sus terminales de conexión según fabricante.

3.11 Control de temperatura y corriente para sistema Láser de fabricación propia

El control de temperatura del sistema láser se realiza mediante el controlador de temperatura TED 200 (Thorlabs) conectado mediante un cable de dos terminales para conectores de 9 pines hacia el sistema láser. El terminal del sistema láser al que se conecta el controlador de temperatura, esta unido a un termistor TH10K posicionado en la base “T” que soporta el cilindro LT230P-B (Thorlabs) que contiene el diodo láser y el lente esférico, provocando de esta forma, un control de la temperatura a la que esta sometido el diodo láser de forma de evitar variaciones en la emisión de este último. El controlador de corriente para el diodo láser es el LDC205 (Thorlabs) conectado mediante un cable de dos terminales de 9 pines al sistema láser. El terminal del sistema láser al que se conecta el controlador de corriente, está conectado al sistema de protección de corriente y luego este se conecta directamente al diodo láser. El controlador de corriente debe ser configurado de forma de colocar el límite de corriente que tiene el diodo TOLD 9221M que finalmente se utiliza en cilindro LT230P-B (Thorlabs). Finalmente, considerando todos los puntos anteriormente mencionados se muestra en la Fig.45 el resultado final de la fabricación del láser.

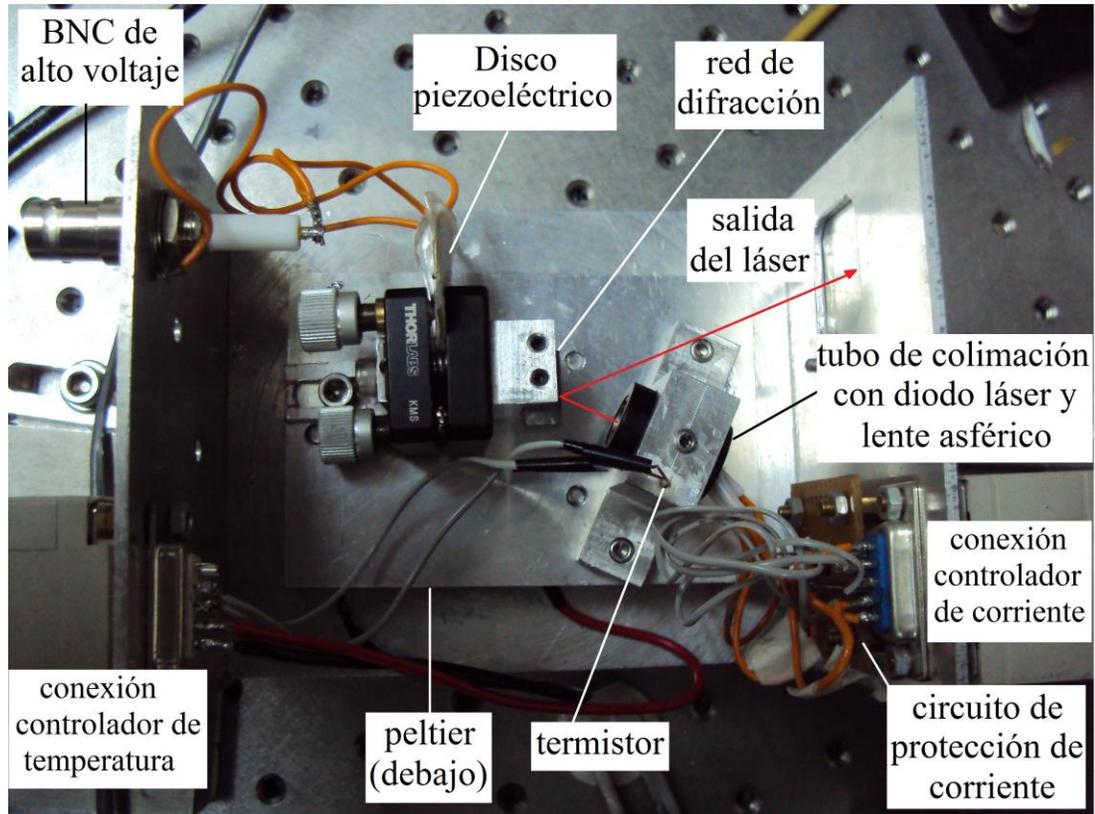


Figura 45. Vista final del láser sintonizable fabricado.

3.12 Cálculo del aporte del movimiento traslacional y angular para barrido en frecuencia dentro de la cavidad Littrow

Se realizó un cálculo para conocer los límites de barrido para un sistema resonante tipo Fabry Perot como lo es el sistema láser conformado por la cavidad externa Littrow fabricado en el laboratorio con que se desea sintonizar un diodo láser de 670 [nm] de emisión, es decir, cuales son los aportes al cambio de longitud de onda o frecuencia del haz láser de salida por parte del movimiento traslacional axial y angular al desplazar la

red de difracción delimitados por la configuración mecánica con que se fabricó la cavidad Littrow, ya que cuenta con una cavidad externa de longitud $L=2$ [cm].

$$\text{FSR} = \frac{c}{2 \cdot L} = \frac{3 \cdot 10^8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} [\text{m}]} = 7,5 [\text{GHz}] \quad (13)$$

La Ec.13 muestra el rango espectral libre que existe dada la longitud L de la cavidad externa. Dada la longitud de la cavidad, ahora se puede calcular las N medias longitudes de onda que soporta la cavidad, las que se aprecian en Ec.14.

$$N = \frac{L}{\frac{\lambda}{2}} = \frac{2 \cdot 10^{-2} [\text{m}]}{\frac{0,67 \cdot 10^{-6}}{2} [\text{m}]} = 6 \cdot 10^4 \quad (14)$$

Si ahora la cavidad es barrida entre la longitud inicial L de la cavidad externa llegando hasta el límite de media longitud de onda, sin llegar a desplazarse esta última distancia en forma exacta, entonces dentro de ese tramo se estará variando la longitud de onda, produciendo un $\Delta\lambda_{\text{MÁX}}$, como se observa en Ec.15, que es el máximo barrido que se puede estar produciendo dada la longitud de la cavidad externa.

$$\Delta\lambda_{\text{MÁX}} = \frac{\lambda}{N} = \frac{0,67 \cdot 10^{-6} [\text{m}]}{6 \cdot 10^4} = 0,005 \cdot 10^{-9} [\text{m}] = 5 [\text{pm}] \quad (15)$$

Lo anterior traducido a un desplazamiento en frecuencia desde 670 [nm] se puede observar en Ec.16.

$$\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda = 3,3 [\text{GHz}] \quad (16)$$

La Ec.16 muestra el barrido máximo en frecuencia logrado en una cavidad de $L=2$ [cm] para un láser de diodo centrado en torno a los 670 [nm]. Ahora, el aporte a la variación en frecuencia o longitud de onda proporcionada por el cambio angular en la red de la cavidad Littrow viene dada a partir de la Ec.17 hasta la Ec.18.

$$\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\theta) \quad (17)$$

A partir de la Ec.17 se puede obtener la variación de la longitud de onda en función de la variación del ángulo de la red de difracción de la cavidad externa Littrow, en Ec.18.

$$\Delta\lambda = 2 \cdot d \cdot \cos(\theta) \cdot \Delta\theta = 2 \cdot \frac{10^{-3}[\text{m}]}{1200} \cdot \cos(23) \cdot \frac{0,67}{2} \cdot \frac{10^{-6}[\text{m}]}{2 \cdot 10^{-2}[\text{m}]} = 25 \cdot 10^{-12}[\text{m}] \quad (18)$$

Por lo tanto la Ec.19 muestra la variación en frecuencia provocada por el cambio angular de la red respecto a un pivote geométrico puntual.

$$\Delta\nu = 18[\text{GHz}] \quad (19)$$

En estos cálculos se muestra que la componente angular es muy importante y causa mayor influencia en el corrimiento de la frecuencia que la traslación axial de la red de difracción.

3.13 Construcción de horno para absorción en vapor de litio neutro

La construcción de un horno en el laboratorio de óptica tuvo por finalidad crear un sistema de vacío de presiones iguales o menores a 10^{-3} [Torr] (Se debe considerar como referencia que 760 [Torr] es una atmosfera.) que contenga vapor de litio neutro dentro de él, para así lograr, que un láser de diodo sintonizable entorno a los 670 [nm] se absorba

en el vapor, y así, encontrar las líneas de absorción de este material. El diseño y construcción de este sistema se basó en el armado mediante diferentes partes comerciales, ensambladas al vacío mediante sellos. Se analizaron y realizaron 3 configuraciones del sistema con las piezas disponibles. La primera configuración se puede ver en la Fig.46 en su vista principal, en la Fig.47 con su vista lateral del lado este y en la Fig.48 en su vista lateral oeste. El sistema cuenta con una cámara en cruz de 5 salidas 2-3/4" (MDC- Vacuum, modelo 405001) en donde tres de las salidas cuentan con ventanas de vidrio de 2-3/4" (MDC, modelo 450002). Una cuarta salida esta conectada a un nipple 2-3/4" (MDC-Vacuum, modelo 402002) que a la vez se le ensambla un segundo para extenderlo. Al final de esta extensión se coloca un cilindro de bronce que contiene la muestra de Al-Li que será evaporada. El cilindro de bronce se utiliza con el fin de alojar en forma segura y centrada la muestra de Litio a evaporar además de cumplir la función de que el material de este cilindro o "camisa" transmita el calor hacia la muestra para que evapore el Li. En el diseño de la "camisa", se consideró la forma de la muestra Al-Li ya que ésta es un cilindro hueco y abierto en uno de sus extremos, y en el otro, cuenta con una superficie semicerrada pues tiene un orificio centrado por el que es posible que salga el vapor. Considerado esto, la "camisa" de bronce esta diseñada y fabricada con esta configuración, es decir, en uno de sus extremos tiene un orificio centrado al igual que la muestra. Ambas superficies con orificios (de la camisa y de la muestra) son colocadas hacia el mismo lado y mirando hacia el interior del sistema para que al evaporarse la muestra, el vapor a alta temperatura, sea expulsado de la cavidad como un jet de gas caliente hacia el resto de este. Una muestra del diseño de la "camisa" se puede observar en Fig.49.

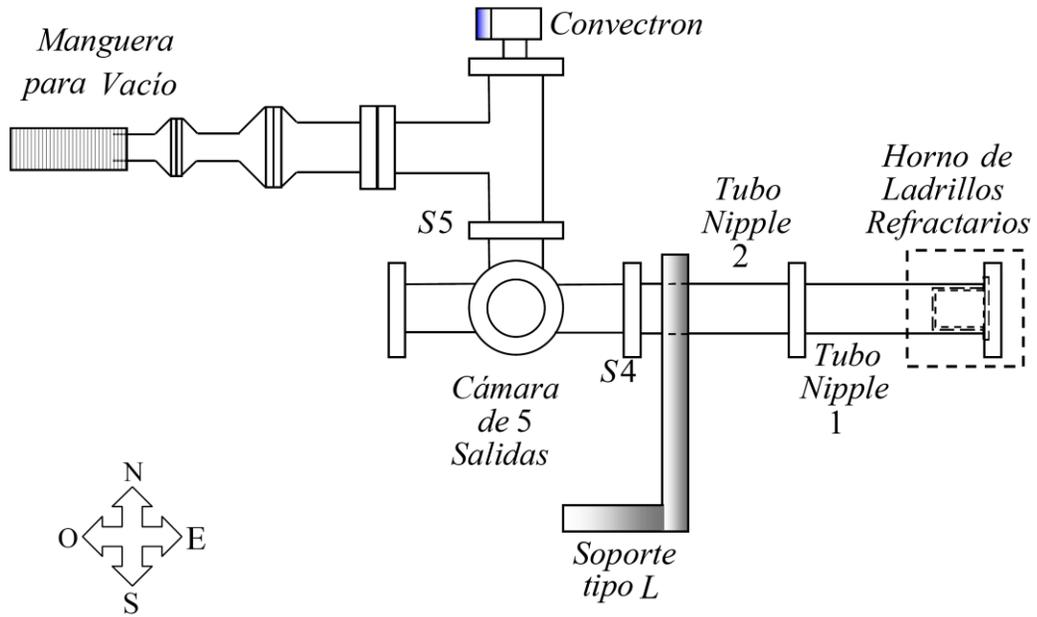


Figura 46. Vista principal de primera configuración de sistema de vacío diseñado para evaporación de litio desde una muestra de aleación Al-Li. La denominación S # significa Salida y el número de la salida.

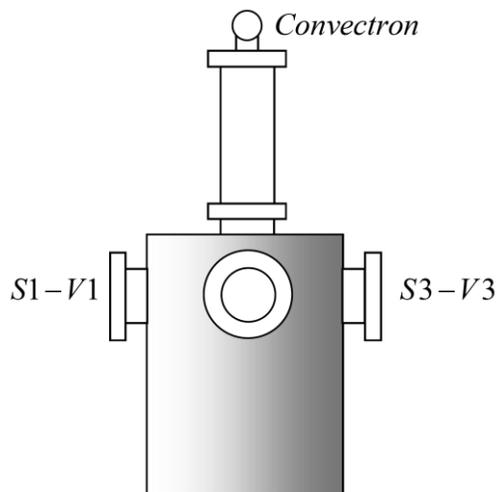


Figura 47. Vista lateral de la primera configuración de sistema de vacío diseñado para evaporación de litio desde una muestra de aleación Al-Li.

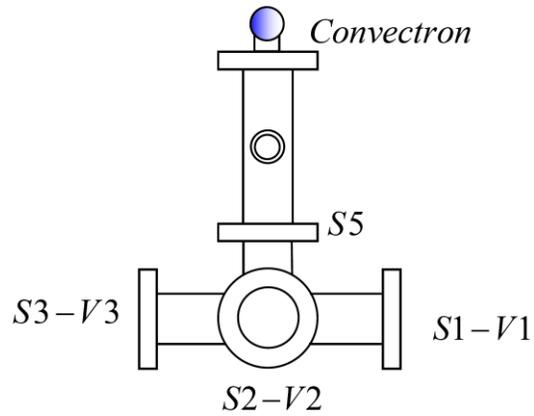


Figura 48. Vista lateral Oeste de la primera configuración de sistema de vacío diseñado para evaporación de litio desde una muestra de aleación Al-Li

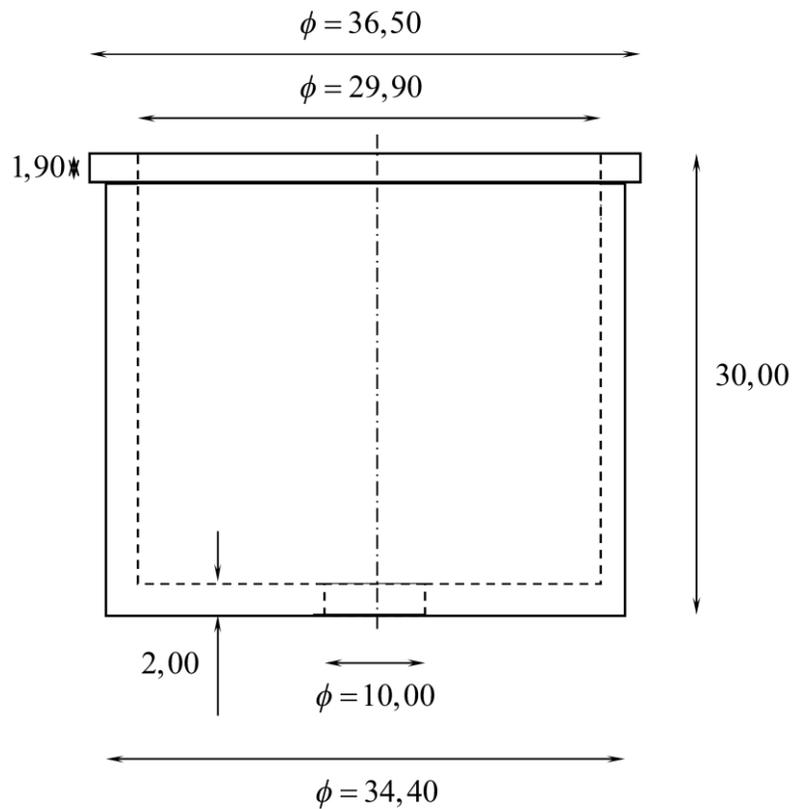


Figura 49. Diseño de camisa para sujeción de muestra Al-Li para generación de vapor de Litio. Esta camisa que sostiene la muestra es colocada en la primera configuración para sistema de evaporación de muestra de Al-Li. Su posicionamiento se puede observar en la Fig.46. Todas las medidas de la figura están en [mm].

La quinta salida de la cámara en cruz de 5 salidas 2-3/4" (MDC- Vacuum, Mod. 405001), que es una salida en 90° respecto a las otras cuatro, se utilizó para conectar una TEE (MDC-Vacuum, Modelo 404002) que queda con dos salidas libres. En la primera de estas salidas, que es la salida vertical, se conecta un convectron (Granville Phillips, Modelo 275), visto en azul en la Fig 46, el cual se utiliza para medir el nivel de vacío dentro del sistema. La segunda salida libre de la TEE, que esta en 90° respecto de la salida anterior, queda unida a un conector 2-3/4" a NW40 para luego ensamblarlo a un reductor de NW40 a NW25. Finalmente se conecta a un half nipple NW25 para conectarlo a la manguera de vacío. Para generar el vapor dentro del horno en esta primera configuración, se utilizaron dos ladrillos refractarios con ampolletas de haluro metálico adosados ellos, que unidos por una estructura, forman una abrazadera de fabricación propia que calienta la zona que ocupa la muestra en el horno a temperaturas suficientes para que esta genere vapor de Litio. La muestra Al-Li debe alcanzar temperaturas de al menos 250 [°C] por lo que el sistema de ladrillos refractarios debe cumplir con esta condición. La segunda configuración es igual a la anterior, con la diferencia de que no lleva el segundo nipple 2-3/4", lo que acorta la estructura. Al extremo de este único nipple se coloca ahora el cilindro de bronce que contiene la muestra de Al-Li a evaporar. En ese extremo además se sella el sistema mediante una tapa de sellado o *blank*. La muestra es evaporada mediante la abrazadera de ladrillos refractarios al igual que en la primera configuración. La tercera configuración es igual a la primera, posicionando en la cuarta salida horizontal de la cámara de 5 vías, la extensión con dos nipples 2-3/4". Ahora, la diferencia con el primer y segundo sistema es que éste es sostenido por la L de aluminio desde el principio del ultimo nipple de la extensión dado que el sistema calienta la muestra con kanthal, material resistivo que es cubierto con cerámicos refractarios para calentar el sistema alrededor de los 400 [°C] y que es enrollado alrededor del primer tubo nipple de la extensión, en donde se encuentra la muestra en esta configuración. El khantal es un material altamente resistivo, con una resistividad de $1,10E-06$ [Ω/m] y que es capaz de resistir hasta 1800 [°C] sin perder su estado sólido. La posibilidad de alcanzar altas temperaturas y emitir altas cantidades de

calor a través de unos pocos amperes, hace relevante su uso en este sistema. Para entregar la corriente al kanthal se utiliza un VARIAC que administra el voltaje entre los extremos del material y que es capaz de entregar hasta un máximo de 8 [A]. Esta configuración entrega la temperatura suficiente al sistema para que se pueda generar el vapor de litio desde la muestra.

Finalmente luego de pruebas las temperaturas alcanzadas con estas tres configuraciones probadas no son competitivas respecto a las que se alcanzan con el Heat Pipe, por lo que en definitiva, no se utilizó experimentalmente para la absorción de litio.

3.14 Diseño y Fabricación de abrazadera de ladrillos refractarios para calentamiento de la muestra Al-Li

Los ladrillos son obtenidos en una tienda comercial de productos de ferretería y son trabajados para formar una abrazadera de ladrillos refractario que forman el horno de ladrillos refractarios. El diámetro de la abrazadera es del diámetro del tubo nipple 2-3/4". Por lo anterior, cada ladrillo cuenta con un sacado interno para que quepa la unión del blank y el nipple 2-3/4" y con una entrada semicircunferencial sobre una de sus paredes, (la de mayor longitud pues es un rectángulo), que tiene el radio del tubo nipple 2-3/4". Uno de los ladrillos en su parte superior tiene 2 agujeros para colocar 2 ampolletas de Haluro Metálico de 150 [W]. Para dar forma a esta abrazadera y que se comporte como tal, los ladrillos son unidos mediante una estructura metálica que consta de 2 bisagras por el lado posterior del horno, una estructura que sostiene ambos ladrillos, y por delante cuenta con dos tornillos que aprietan esta abrazadera. El sistema tiene la capacidad de entregar alrededor de 300 [°C] alrededor del área en donde actúa. Una vista real del horno terminado se puede apreciar en Fig.50.

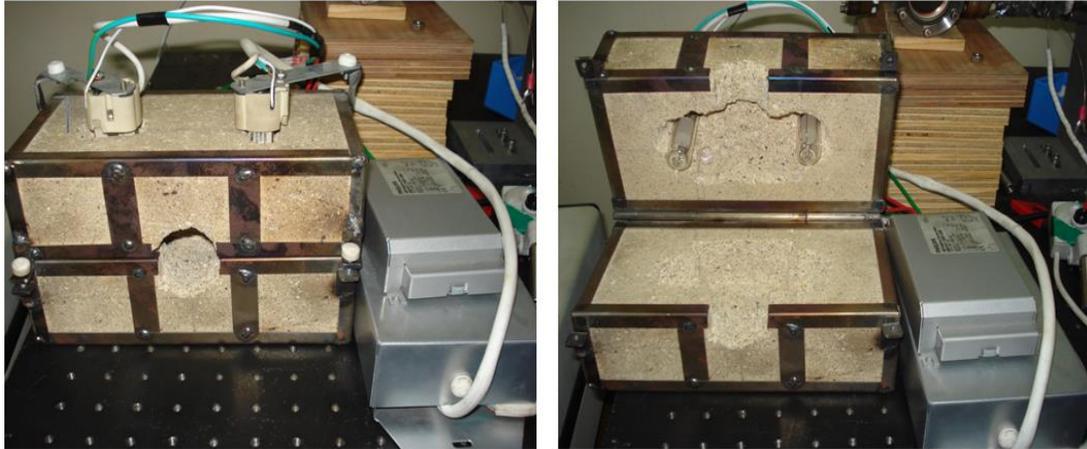


Figura 50. Vista real del horno de ladrillos refractarios terminado. Su posicionamiento en el sistema de evaporación se puede visualizar en la Fig.46.

3.15 Heat Pipe: Implementación y puesta en marcha

La implementación y puesta en marcha de un sistema de Heat Pipe (Comstock) tuvo por finalidad obtener un sistema capaz de generar y mantener un vapor de Litio controlado en un volumen determinado de una pipa de acero mediante un gas buffer y un sistema de enfriamiento para poder realizar absorción en el vapor. El Heat Pipe cuenta con un controlador de temperatura. La estructura mecánica y de vacío del Heat Pipe cuenta con una estructura metálica de Aluminio que sostiene un tubo nipple 2 3/4" (MDC-Vacuum, Modelo 402002). Las dos salidas del tubo cuentan con dos ventanas de safiro de la misma medida (MDC-Vacuum, modelo 453001) las cuales tienen la característica de tener un backout máximo de 450 °C y un gradiente termal máximo de 25 °C/min. El material específico de su ventana es de Al_2O_3 y su borde de NiFe. La transmisión de las ventanas en las longitudes que se usarán están del orden del 85% para longitudes de onda entorno a los 670 [nm]. El tubo nipple 2 3/4" esta envuelto y rodeado de capas de yeso de alumina en donde se posa el alambre resistivo que genera la emisión de calor hacia el tubo. El horno del Heat Pipe cuenta con dos termocuplas, en ambos extremos del horno, que tienen conectores externos para saber la temperatura del sistema. Estas

termocuplas son conectadas al controlador de temperatura que muestra la lectura, y además, este mismo es capaz de entregar la corriente al alambre resistivo. Mediante un set point en el controlador se puede hacer un set para la temperatura deseada. Este sistema de calentamiento de alambre resistivo con capas de yeso de alumina, cubre una cierta superficie del tubo nipple 2 3/4" y el resto queda descubierto. Como queda una zona descubierta en ambos extremos, existe un espacio en donde están colocados los sistemas de tuberías para enfriamiento, medición de vacío y entrada de gas buffer. El sistema de enfriamiento consta de dos tramos de tubería metálica enrollados y soldados uno a cada extremo del tubo nipple 2 3/4". Una tubería es para la entrada del agua y la otra para la salida. Ambos tramos de tubería son para manguera de 1/2". Esta entrada y salida forma un circuito cerrado de circulación de agua mediante la conexión a una bomba de agua. La bomba de agua esta unida en forma horizontal a un tambor de 40 Litros mediante una cañería de PVC, desde el cual, extrae el agua necesaria para la circulación. En su parte superior, la bomba de agua bombea hacia el sistema, por lo que está conectada a una manguera de 1/2" mediante un reductor, para así, introducir un flujo al sistema. Luego, esta se conecta a una Tee, en donde una de las salidas de la Tee, que sigue la línea de su entrada, se conecta mediante otra manguera de 1/2" a la entrada del sistema de enfriamiento. La otra salida de la Tee se utiliza para regular el caudal que se mete al sistema ya que es conectada a una llave de agua y luego ésta da hacia el tambor (reservorio), es decir, se devuelve agua a la fuente o reservorio. Por último, la salida del sistema de enfriamiento, en este caso, es conectado a una manguera de 1/2" y esta manguera situada en el tambor para que se devuelva el agua al sistema. El flujo temporal del sistema es de 2 litros por minuto. Un esquema del sistema de enfriamiento se muestra en la Fig.51.

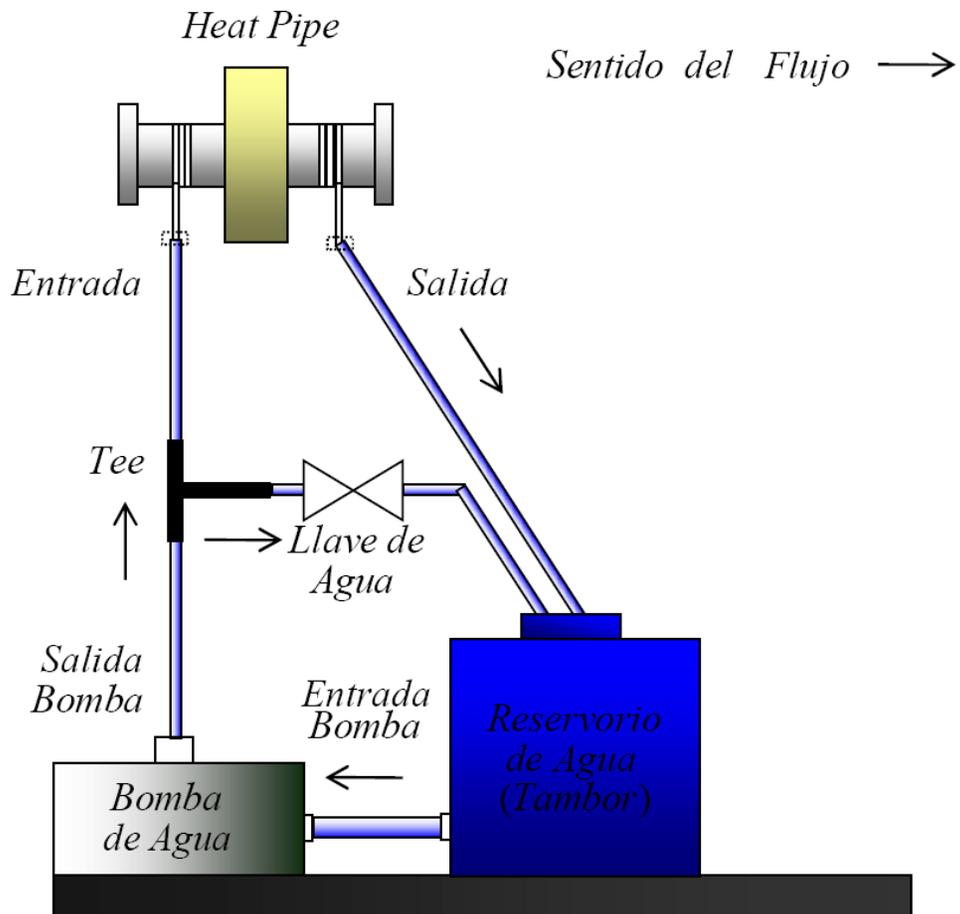


Figura 51. Sistema de enfriamiento para sistema Heat Pipe. Las líneas discontinuas en la entrada y salida indican las abrazaderas que deben ir en cada manguera.

Por su parte, el sistema de vacío está formado por un circuito de cañerías metálicas de 1/4", sellos Swagelock, codos, conectores de tubo, llaves y medidores de vacío, además de la bomba de vacío de paletas rotatoria (Varian, modelo DS202) .Los extremos libres del tubo nipple 2 3/4", están conectados, ambos, a tuberías de 1/4", que para extender su longitud, fueron conectadas a sellos Swagelock. Ambas cañerías terminan conectadas a Tee's con sellos Swagelock para tuberías de 1/4".Una las Tee's es de vital importancia pues finaliza en uno de sus extremos con una boquilla NW16 en donde es conectado un convectron (Granville Phillips 275) con boquilla NW16.La otra Tee, permite conectar

ambas tuberías de cada lado del tubo nipple 2 3/4". Por la tercera salida de esta última Tee, se conecta una tubería doblada en 90° con un sello Swagelock en sus extremos. Este sistema de vacío se completa en ese punto con un tubo recto conector para tuberías de 1/4" (Swagelock, modelo SS-400-6,) conectado a un codo de 90° (Swagelock) para bajar el sistema. Luego se encuentra una Tee de unión 1/4" OD (Swagelock, modelo SS 316,) que queda con dos salidas libres. A partir de este punto se generan básicamente dos configuraciones para hacer vacío y sellar el sistema. Para la primera configuración la primera salida libre de la Tee, está conectada a una válvula de aguja micrométrica (Swagelock, modelo B-SS4-VH) mediante un tubo metálico de 1/4", que a su vez, está conectada mediante una tubería plástica de 1/4" (Swagelock, modelo Tubing PE 1/4" OD) con un cilindro antideformable (Importadora Alte, modelo SS-405-3) al cilindro de Helio. Para conectar al cilindro de Helio, se coloca la tubería plástica sujetándola con una abrazadera. Por último la segunda salida libre de la Tee, está conectada a la bomba de vacío, que extrae el aire del sistema. Esta parte del sistema está constituido por un tubo metálico de 1/4" que llega a una llave de corte de agua que sirve en alguna medida para mantener el vacío que es conectada mediante tubería 1/4" a la Tee. Su otro extremo es unido a una boquilla NW16. Como la manguera de vacío es de norma NW25, se utiliza un reducto NW25 a NW16 para poder conectar boquilla NW16 con manguera de vacío. Un esquema de la primera configuración global del Heat Pipe se muestra en la Fig.52 con una vista real del sistema descrito. Por último, ambos tubos conectados al tubo nipple 2 3/4" tienen la misión de que por ellos pase el **gas buffer** que es gas de Helio extra puro (Marca **AGA**, 99.995% mínimo-He, cilindro de gas).

Este Horno tipo Heat Pipe es el sistema que se utilizó para la absorción de litio dado que es el sistema en donde se puede controlar de mejor forma la temperatura que alcanza la muestra de litio y por lo tanto de donde se puede obtener mejor información y más controlada para distintas cantidades de vapor dentro del horno.



Figura 52. Vista real de sistema Heat Pipe terminado. En la figura se aprecia en la imagen de la izquierda, el cuerpo principal del Heat Pipe, el cual muestra la cámara de vacío (tubo de acero con ventanas para alta temperatura) y el horno cerámico que lo cubre en la parte exterior. En la imagen de la derecha se puede apreciar el sistema de enfriamiento terminado y posicionado en el laboratorio.

3.16 Evaluación de funcionamiento de Interferómetros

El obtener información acerca del correcto funcionamiento alcanzado con el interferómetro Fabry Perot confocal construido en el laboratorio, implica compararlo con el rendimiento de interferómetros del mismo tipo, pero comerciales, que son equipos aun más sofisticados en su fabricación y por lo tanto más exactos para manejarlos y poder alcanzar mejores valores de Finesse. No es relevante el láser con que se evalúe la alineación interna y el rendimiento de cada interferómetro, siempre y cuando el haz láser, este dentro del rango de longitudes de onda en que los espejos del FPI confocal funcionan con su máxima reflectividad. Además, para poder acercarse a la Finesse teórica, se debe alinear en forma muy precisa el haz incidente sobre el interferómetro,

para luego, poder hacer correcciones a la alineación interna del mismo, puesto que la Finesse alcanzada en un FPI, es muy sensible a la alineación del sistema y por lo tanto a la cantidad de luz que entra en él. El FPI confocal construido con $FSR = 3$ [GHz] se analizó utilizando un haz desde sistema láser construido, funcionando con el primer diodo ensamblado en él, el diodo láser HL6714G (Hitachi). De la misma forma, para comparar su funcionamiento y rendimiento, se usó el FPI confocal disponible en el laboratorio FPI100 (Toptica) con $FSR = 1$ [GHz] con el cual se usó láser 2010 EOSI (diodo láser SN00669@70 [mA]). Un tercer Interferómetro fue utilizado, el FPI confocal Burleigh con $FSR = 2$ [GHz] analizando su funcionamiento con el Láser 2010 EOSI (diodo láser SN00669@70 [mA]). En base a las mediciones se midió la Finesse lograda por cada uno de ellos para probar el buen funcionamiento del sistema interferométrico construido. Un esquema de la disposición de los elementos para la medición se muestra en la Fig.53.

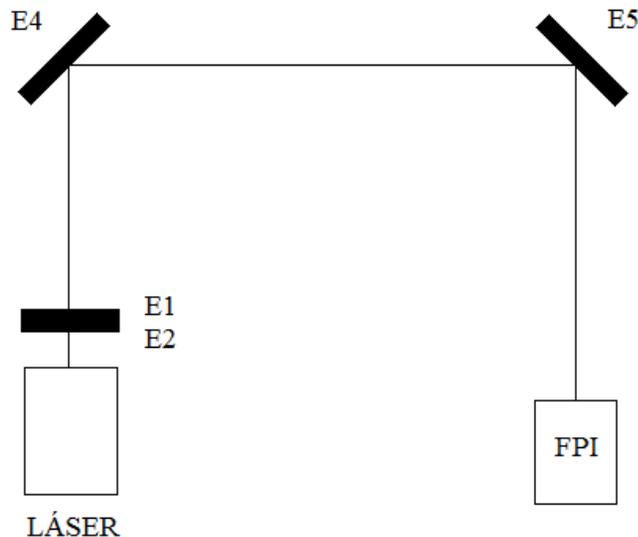


Figura 53. Esquema para disponer los elementos ópticos y de medición en el banco óptico para realizar el análisis de cada láser disponible en términos de potencia, estabilidad y barrido

3.17 Medición de potencia en láseres.

Para la medición de potencia se utilizaron los dos láseres disponibles, el láser de construcción propia funcionando con el diodo TOLD9221M (Toshiba) y láser 2010 EOSI. El láser de construcción propia se debe retroalimentar previamente con la red de difracción. Luego, para ambos láser se tomaron datos de potencia con un medidor de potencia óptica (Newport, optical powermeter) variando la corriente suministrada, en forma gruesa desde 0 [mA] (aumentando 10 [mA] cada vez aprox.) hasta el momento en que se consigue la corriente umbral de cada láser que es donde comienza a emitir luz láser. De esta forma se debe tomar el dato de corriente umbral y luego aumentar la corriente en intervalos de 5 [mA] desde la corriente umbral hasta sus límites máximos de operación.

3.18 Barrido con piezoeléctricos de Disco Delgado

En el sistema láser construido se probaron piezoeléctricos de disco delgado, del tipo que se observa en Fig.54, responsables de la amplitud del barrido para su sintonización. Utilizando el sistema láser construido con el diodo láser TOLD 9221M (Toshiba), se pusieron a prueba dos piezoeléctricos de disco delgados soldados, los cuales al conformar una unidad, se instalaron haciendo contacto con el tornillo de la montura KMS (Thorlabs), que soporta la red de difracción, de forma que el desplazamiento afectara el movimiento lateral de la montura. Instalado el piezoeléctrico y realizado el trabajo de retroalimentación de la red de difracción sobre el diodo láser, se aplicó una señal triangular de entrada de alto voltaje (entre 0 y +700 [V]) al piezoeléctrico mediante una fuente de (Trek, modelo PZD700) en configuración de +1,4 kV. Finalmente se envió el haz sobre un Interferómetro Fabry Perot comercial de la empresa Burleigh sin aplicar una señal de barrido sobre él, para finalmente, observar la capacidad de escaneo del láser con el piezoeléctrico utilizado y poder observar su barrido en frecuencia.

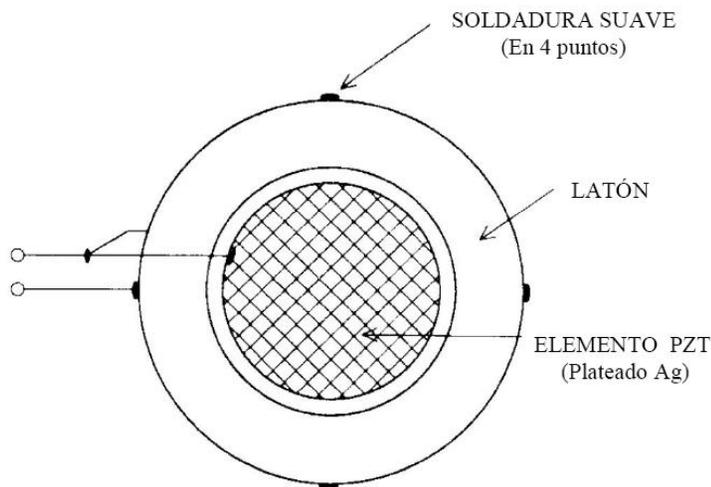


Figura 54. Tipo de piezoeléctrico de disco delgado usado para formar una unidad piezoeléctrica para barrido.

3.19 Barrido con Piezoeléctrico de disco C-5500

En el sistema construido en el laboratorio y con el mismo procedimiento anterior, se instaló en el sistema láser, un piezoeléctrico de disco (Channel Industries, modelo C-5500 Lead zirconate titanate), como el mostrado en la Fig.55, al cual se le aplicó una señal de entrada de alto voltaje triangular (+1000 [V]) en la dirección perpendicular al plano de las caras (thickness extensional mode) mediante una fuente (Trek, modelo PZD700) en configuración de +1,4 kV. Aplicada la señal, se envió haz de luz hacia Interferómetro Fabry Perot confocal comercial de la empresa Burleigh (FSR=2 [GHz]) sin aplicar una señal de barrido sobre él para observar la capacidad de escaneo del láser con el piezoeléctrico utilizado.

Un cálculo del desplazamiento teórico que se debe lograr con este piezoeléctrico, al aplicarle sobre una señal triangular de +1000 [V], se observa en la Ec.12 sabiendo que

piezoeléctrico de disco tiene como característica un diámetro externo de 0,5", y un grosor de 0,125" y constante del piezoeléctrico $d_{33} = 400 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{m}}{\text{V}} \right]$.

$$\Delta t = d_{33} \cdot V = 400 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{m}}{\text{V}} \right] \cdot 1000 [\text{V}] = 400 [\text{nm}] = 0,4 [\mu\text{m}] \quad (20)$$

La Ec.20 fue obtenida desde el fabricante y muestra en definitiva la variación del grosor del disco piezoeléctrico mencionado al aplicar los valores antes mencionados.

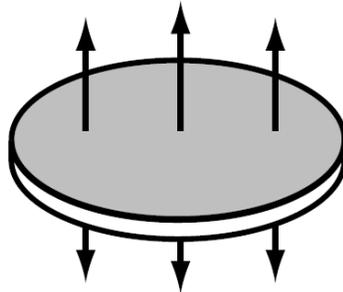


Figura 55. Disco piezoeléctrico C-5500 (Lead zirconate titanate) que muestra la dirección de estiramiento y contracción en que se usó.

3.20 Barrido con piezoeléctrico interno de Láser 2010 EOSI

Se analizó la capacidad de barrido en frecuencia que se logra con el piezoeléctrico interno del Láser 2010 EOSI aplicando una señal interna de voltaje mediante el sistema de control con que cuenta el láser. Se aplicaron valores entre +5 y +140 [V] sobre el piezoeléctrico. Finalmente se envía haz de luz hacia Interferómetro Fabry Perot confocal comercial de la empresa Burleigh (FSR=2[GHz]) sin aplicar una señal de barrido sobre él para observar la capacidad de escaneo del láser con el piezoeléctrico utilizado.

En cada uno de los casos anteriores, la señal de interferencia captada desde el interferómetro, entrega una señal periódica de peak (si es estable el láser), los cuales, se

repiten con una distancia en frecuencia igual al FSR del interferómetro utilizado. Por lo tanto, para conocer el barrido que se está logrando con el piezoeléctrico del láser sintonizable, se deben contar los espaciados entre peak de la señal y multiplicarlos por la el FSR del interferómetro utilizado.

3.21 Absorción en vapor de litio neutro en Heat Pipe

La absorción de gas de litio es el procedimiento central para probar el funcionamiento de un horno que genera vapor de litio o celda de calibración. Se utilizó Heat Pipe con fuente de corriente (Comstock), el Láser 2010 EOSI ,un monocromador (Thorlabs), el interferómetro comercial de la empresa Burleigh con FSR= 2 [GHz], un fotodiodo (Thorlabs, modelo PDA36A-EC),un osciloscopio (Tektronix, modelo TDS3014-B), un generador de señales (Instek , modelo GFG-3015) y la óptica necesaria para configurar el recorrido óptico mostrado en la Fig.56.

El montaje constó de la instalación del láser sobre el banco óptico, elevando su haz hasta la altura del centro de la ventana de entrada del Heat Pipe de forma de que el haz saliera por el centro de la ventana de salida del mismo, colocando en ese lugar un fotodiodo y un amplificador (Toptica, modelo PDA-S) conectado hacia el osciloscopio que entrega la señal de absorción. Previo al haz que entra por la primera ventana del Heat Pipe, se instala un vidrio de microscopio (porta objeto) que actúa como divisor de haz, enviando el haz perpendicular a la entrada del haz sobre el Heat Pipe, de forma de enviarlo hacia la fibra óptica que está conectada al monocromador. Mediante el programa computacional SPLICCO de la empresa Thorlabs, se hace lectura de la longitud de onda de centrado que tiene el haz láser. También, previo a la entrada del haz sobre el Heat Pipe, se instala un beam splitter 50/50 que desvía el haz perpendicular a la entrada del mismo, de forma de llevarlo hacia el espejo E3, según Fig.56. Luego los espejos E5 y E6 son responsables bajar la altura del haz hasta el nivel de la entrada del interferómetro comercial de la empresa Burleigh.

Antes de encender el horno y realizar experimento de absorción, el procedimiento comenzó por dar valores de operación y analizar el láser 2010 EOSI. Es necesario centrarlo entorno a 670,784636 [nm], lectura obtenida desde el monocromador. Lo anterior se logró apretando el botón *wavelength* del panel de control del láser una vez, esperando su autocalibración, luego se giró la perilla hasta colocar en 672,2 [nm], se presionó nuevamente botón *wavelength* (en pantalla dice running), se esperó que se estacionara en la longitud, se giró perilla hasta 671 [nm], se presionó nuevamente el botón *wavelength* (en pantalla dirá running), esperando que se estacione en la longitud de onda y finalmente se giró la perilla hasta llevar ahora a 672,3 [nm], apretando el botón *wavelength* por ultima vez (en pantalla dice running) y esperando que se estacionara en la longitud, en ese punto se verifica una longitud de onda en 670,784636 [nm] en que el láser se centró. Luego, se apretó el botón PZT del panel de control y se configuró en un voltaje de 50,41 [V]. Luego, se conectó una señal de modulación triangular para escanear, no mayor a 4 [V], con una frecuencia no mayor a 200 [Hz] pues la señal no puede exceder los ± 10 [V]. En este caso se usó un voltaje de 3,62 [V] y una frecuencia de 11,51 [Hz]. La frecuencia es baja para que cuando se pase por la longitud o frecuencia de absorción la señal sea perceptible por el fotodiodo.

Luego se analizó la estabilidad del láser, la cual se debe analizar mediante el FPI. Se conectó la señal desde el amplificador del FPI, sin barrer con el interferómetro, hacia el osciloscopio y se verificó la estabilidad en frecuencia que tiene el láser con la señal de escaneo del láser encendida.

Verificado lo anterior, se encendió el horno Heat Pipe llevándolo a 385 [°C] con sus sistema de enfriamiento también en funcionamiento. A la vez se realizó el vacío en el Heat Pipe utilizando una bomba de vacío de paletas rotatorias (Varian, modelo DS202). Al alcanzar un vacío de ordenes de 10^{-3} [Torr] leídos utilizando un convectron (Granville-Phillips, modelo 275238) conectado a un lector de vacío o multigauge controller (Varian, modelo L8350301), se debió introducir gas de Helio. Con 2[Torr] de

Helio es suficiente para mantener el vapor de litio neutro alejado de las ventanas de entrada y salida del Heat Pipe. Para finalizar el procedimiento, se encendió el fotodiodo conectado al amplificador de señal, conectándolo al osciloscopio.

Un detalle relevante en la medición de absorción, es que se obtuvo utilizando a la entrada del haz láser al Heat Pipe, un filtro que atenúe la potencia de entrada de la luz de forma de no saturar el fotodiodo y trabajar bajo la intensidad de saturación del litio.

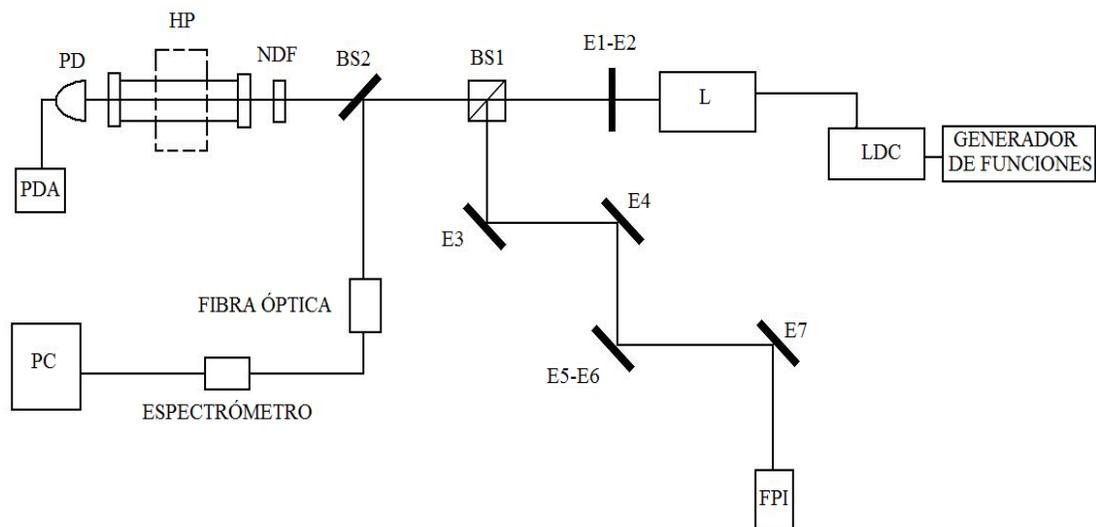


Figura 56. Vista esquemática del montaje experimental principal realizado para obtener la absorción en vapor de litio.

Por último, la Intensidad óptica de trabajo del Láser EOSI 2010 se calcula a partir de la potencia de entrada a la celda y del área de su haz. La potencia de entrada con que se trabajó, medido con powermeter (Newport, optical powermeter), fue de 500 [nW] gracias a un filtro de densidad neutra (NDF) posicionado previo a la entrada del haz del láser a la celda Heat Pipe. El área del haz del láser se calcula asumiendo que su forma se aproxima a una elipse en donde su ancho es de 1 [mm] y su alto es de 4 [mm] por lo que

el valor de su área es de $A = 3,1416 \cdot 10^{-2} [\text{cm}^2]$. Entonces, si la intensidad óptica se define como $I_{op} = P/A$, la potencia con que se trabajó fue de $I_{op} = 0,015915 [\text{mW}/\text{cm}^2]$.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Umbral y potencia del Láser 2010 EOSI

La Fig. 57 muestra la potencia del láser 2010 EOSI en función de la corriente suministrada. En el gráfico también se puede observar la corriente umbral en donde comienza la emisión láser. La temperatura del láser con que se realizó la medición de potencia de salida fue de $T=23,1$ [°C].

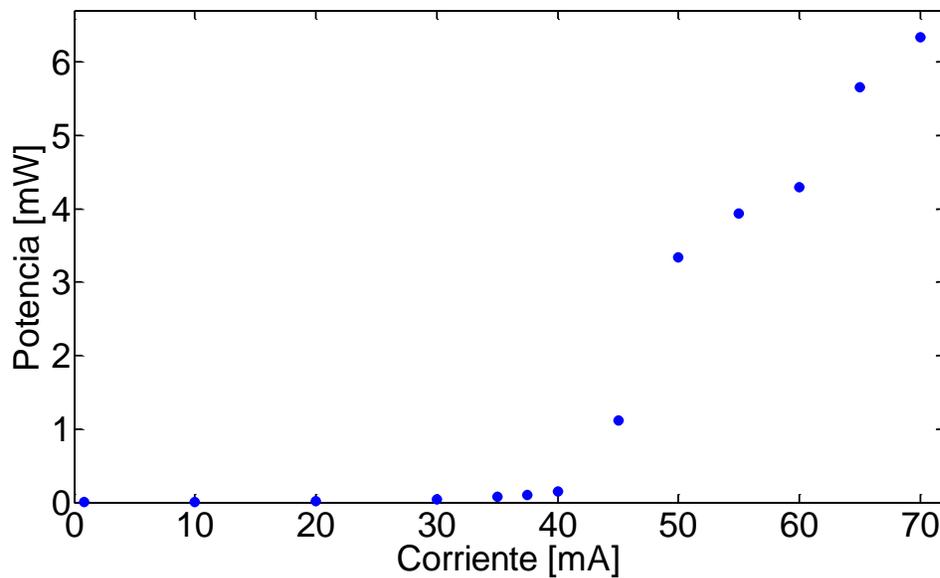


Figura 57. Comportamiento en potencia con que cuenta el Láser 2010 EOSI, utilizado en la absorción en vapor de litio neutro.

4.2 Umbral y potencia del láser TOLD 9221M

La Fig.58 muestra el comportamiento en potencia del diodo láser TOLD9221M que fue instalado en el sistema láser construido en el laboratorio. La temperatura del láser con que realizo la medición de potencia de salida fue de $T=22,6$ [°C].

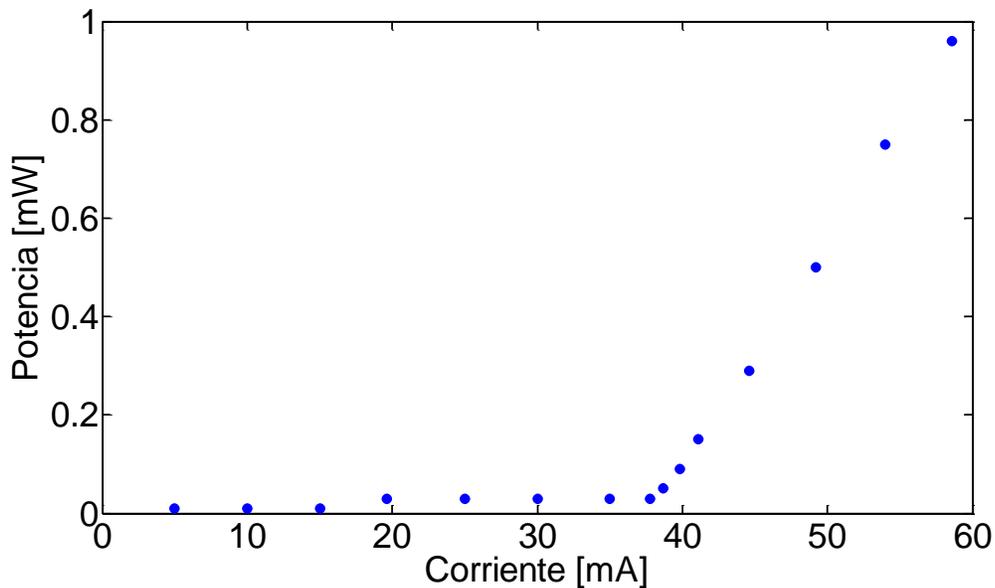


Figura 58. Comportamiento en potencia del diodo láser TOLD 9221M instalado en el sistema láser construido en el laboratorio.

4.3 Barrido de los láseres TOLD 9221M y láser 2010 EOSI

El barrido en frecuencia de los láseres debe observarse por separado. El láser de construcción propia, que cuenta con diodo láser TOLD9221M, cuenta con un piezoeléctrico que permite girar la red de difracción y de esa forma seleccionar la frecuencia del láser. El láser 2010 EOSI contiene otro piezoeléctrico que pivotea la red de difracción. En consecuencia a lo anterior se estudió la capacidad del barrido en

frecuencia con que cuenta cada láser dependiendo de su piezoeléctrico. Las mediciones de la Fig.59, Fig.60 Y Fig.61 fueron realizados con interferómetro Fabry Perot confocal Burleigh con FSR igual a 2 [GHz].

4.4 Barrido con piezoeléctricos de disco delgado

Se presenta en la Fig.59 el resultado del barrido logrado mediante la utilización de dos piezoeléctricos de disco delgado para desplazar la red de difracción del sistema láser de construcción propia. Para su desplazamiento se aplicó una señal triangular de +700 [V] peak to peak, frecuencia de 740 [Hz] , una corriente para el láser de 41,8 [mA] y una temperatura de láser de $T= 23,1$ [°C].

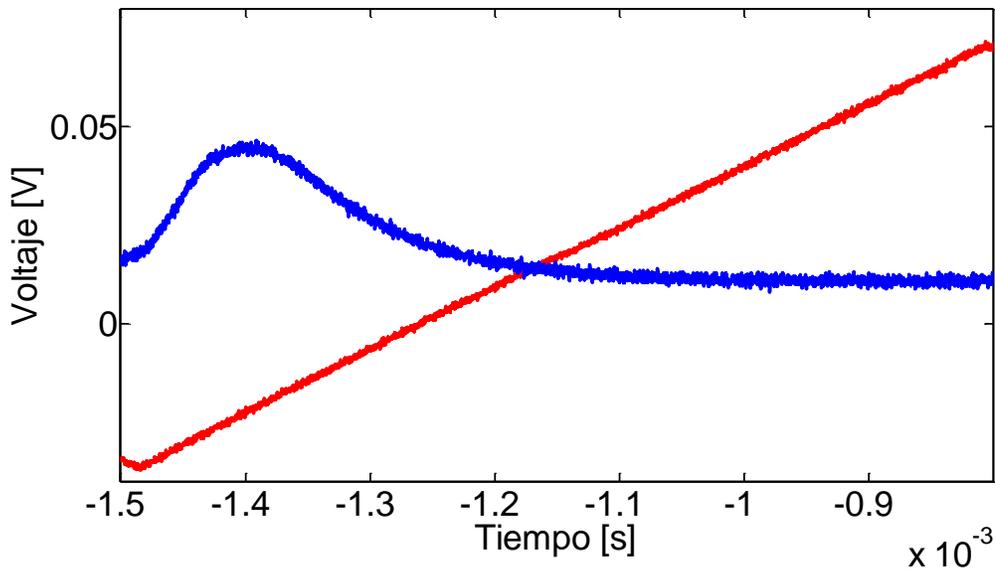


Figura 59. Barrido logrado con piezoeléctricos de disco delgado instalado en módulo láser aplicándoles señal triangular de +700 [V] peak to peak .Barrido fue analizado mediante un FPI confocal comercial Burleigh con un FSR= 2 [GHz]. La señal roja representa la subida de la rampa y la señal azul representa el barrido.

Por último, en la Fig.59, se muestra el barrido alcanzado con los piezoeléctricos de disco delgado, del mismo tipo utilizado y recomendado en ref.[1], el cual, incluso con +700 [V], entrega este resultado muy poco definido y con un barrido apenas en el límite de 2 [GHz]. Las mediciones se hicieron manteniendo el piezoeléctrico de barrido del FPI Burleigh en reposo y solo se barrió con los piezos de los láseres.

4.5 Barrido con Piezoeléctrico de disco C-5500

Se presenta en la Fig.60 el resultado del barrido logrado mediante la utilización de piezoeléctrico de disco (Channel Industries,C-5500) para desplazar la red de difracción del sistema láser de construcción propia, aplicándole una señal triangular de +1000 [V] peak to peak, frecuencia de 20 [Hz] , una corriente para el láser de 42,2 [mA] y una temperatura de láser de $T= 22,6$ [°C].

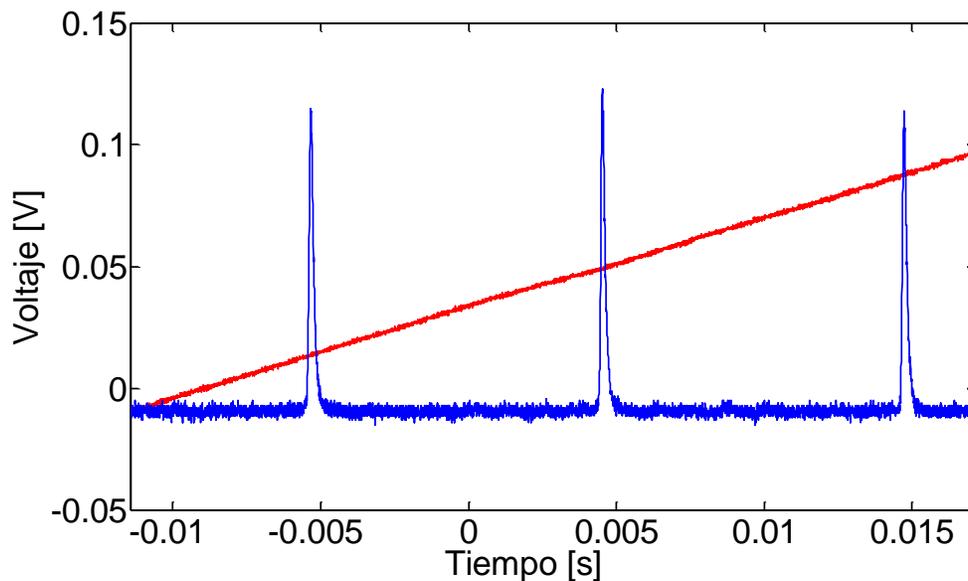


Figura 60. Barrido logrado por piezoeléctrico C-5500 en módulo láser de construcción propia aplicándole señal triangular de +1000 [V] peak to peak .Barrido fue analizado mediante un FPI confocal comercial Burleigh con un FSR= 2 [GHz]. La señal roja representa la subida de la rampa y la señal azul representa el barrido.

Para la Fig.60, se observan 3 peak .Esta figura representa los peak que se observan con el máximo voltaje que se le puede introducir a un piezoeléctrico C-5500 de Channel industries (Lead zirconate titanate) de disco, utilizado en su modo de extensión a lo ancho, limitados por la máxima capacidad de entregar voltaje ya que la fuente de alto voltaje con que se cuenta llega a +1,4 kV. La figura muestra entonces los peak al introducir a la fuente 10 [V] lo que en escala de la fuente conectada al piezo representan 1000[V]. Por lo tanto con +1000 [V] solo es posible barrer 4 [GHz].

4.6 Barrido con piezoeléctrico interno de Láser 2010 EOSI

Se presenta en la Fig.61 el resultado del barrido logrado mediante la utilización de piezoeléctrico interno de Láser 2010 EOSI, aplicándole una señal interna a su piezoeléctrico de 50,41 [V] , corriente del láser de 45,2 [mA] ,temperatura del láser T= 23,1 [°C] y una señal de modulación externa al piezoeléctrico de V=3,62 [V] de frecuencia $f=11,51$ [Hz] y offset de -0,11 [V] .

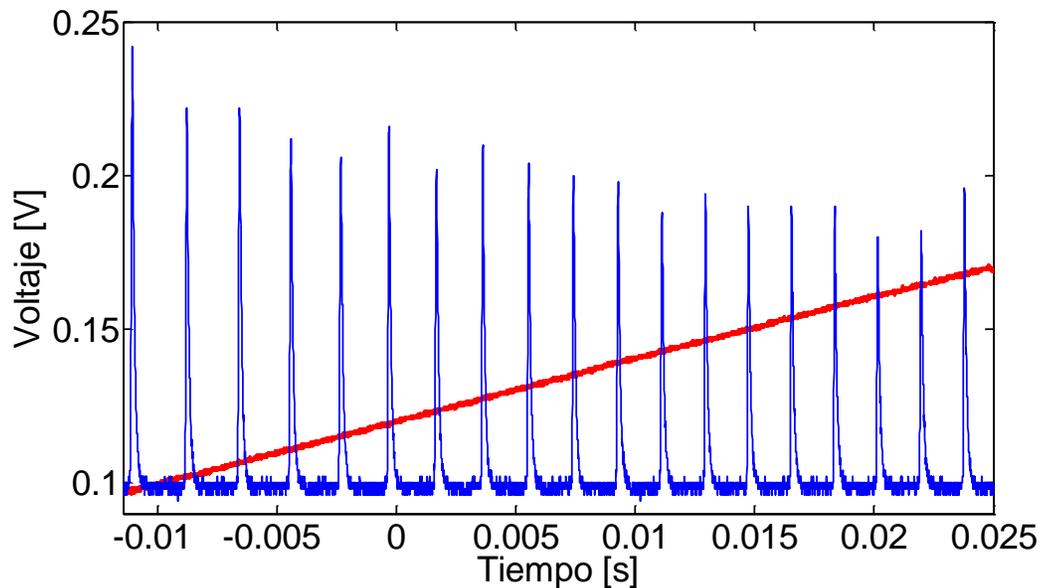


Figura 61. Barrido del láser 2010 EOSI con piezo interno. El Interferómetro usado para obtener esta señal fue un FPI Burleigh con un rango espectral libre (FSR) de 2 [GHz]. La señal aplicada al piezoeléctrico interno es de 50,41 [V] ,usando el láser con corriente $I_{\text{Láser}} = 45,2$ [mA] y $T = 23,1$ [°C]. La señal externa para su barrido fue una señal triangular de $V = 3,61$ [V] de frecuencia $f = 11,51$ [Hz] y offset de $-0,11$ [V] . La señal roja representa la subida de la rampa y la señal azul representa el barrido.

En la Fig.61 se muestra que el barrido que se logra con una señal triangular de aproximadamente 50,41 [V] peak to peak, es de al menos 36 [GHz] para Láser 2010 EOSI y se debe considerar que el máximo permitido para el piezo son 140 [V], por lo que el barrido se puede exagerar aún más. Es importante hacer notar que es el barrido resultante de un láser completamente comercial y de cavidad Littman- Metcalf.

4.7 Rendimiento de Fabry Perot confocal de construcción propia en laboratorio.

En la Fig.62 se muestra la señal de interferencia conseguida con el interferómetro construido en el laboratorio, el cual de acuerdo a la reflectividad con que cuentan sus espejos plano cóncavos tiene una Finesse teórica máxima de $F = 626,74$. Los dos peak

del gráfico muestran el estado modal único en que se encuentra el láser utilizado (diodo láser HL6714G de $\lambda=671$ [nm] nominales) para obtener la señal de interferencia en el FPI confocal. La señal roja muestra la subida de la señal triangular de +104,8 [V] peak to peak y frecuencia de 180 [Hz] aplicada al interferómetro para su barrido.

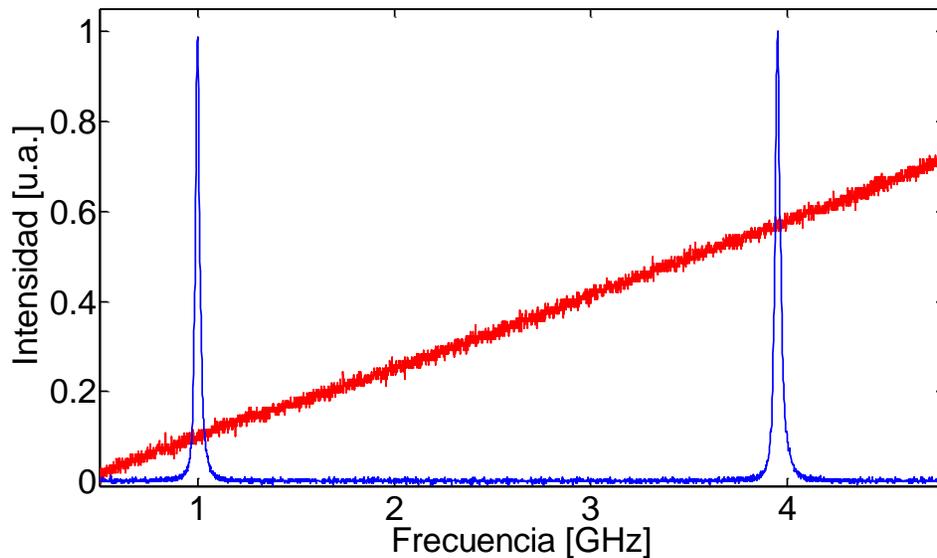


Figura 62. Estado modal del láser HL6714G (Hitachi) obtenido mediante el FPI confocal construido en laboratorio para este trabajo. Representación de uno de los mejores rendimientos que se obtuvieron del FPI construido a partir de espejos plano cóncavos de radio curvatura 25 [mm] y reflectividad del 99,5%. con rango espectral libre FSR=3 [GHz] y Finesse teórica $F= 626,74$. En esta medición se alcanza una Finesse $F=131,23$

La Fig.63 muestra la simetría conseguida en los peak de la señal. Se muestra el aumento a uno de los peak de la señal anterior, el cual, indica el grado de exactitud conseguido al intentar posicionar ambos espejos plano cóncavos del interferómetro de fabricación propia en el laboratorio, es decir, mientras más simétrico el peak, más cercana a la distancia del radio de curvatura de los espejos se está. La distancia requerida para por diseño es de 25 [mm] (radio de curvatura de los espejos plano cóncavos del FPI confocal).

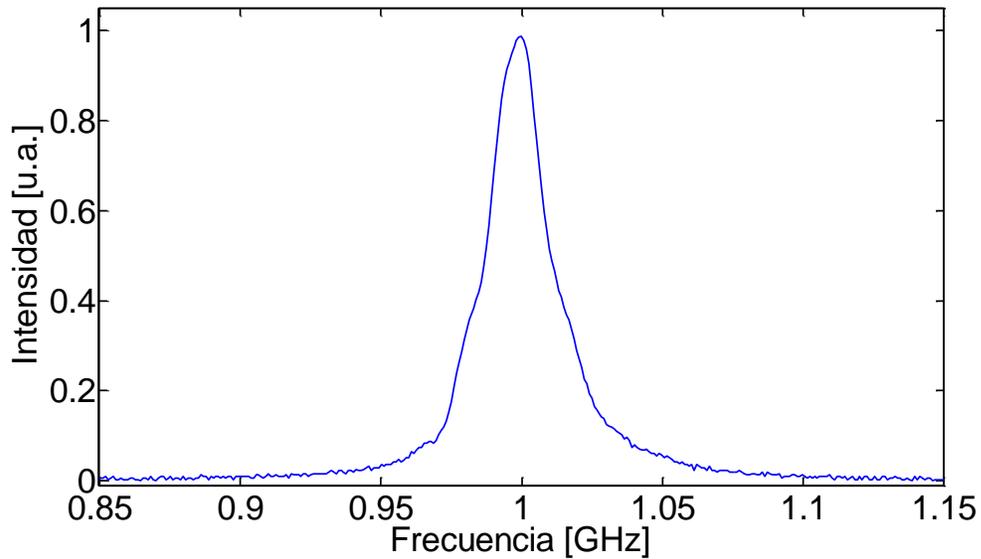


Figura 63. Acercamiento sobre uno de los peak de la señal de Fig.62, tomado con FPI construido, que muestra simetría en peak que delata el buen posicionamiento entre espejos. Mientras más simétrico, más exacto es el posicionamiento confocal a conseguir (FPI construido es de 25 [mm]).

4.8 Rendimiento de Fabry Perot confocal comercial

FPI100 Toptica

En la Fig.64 se muestra la señal de interferencia conseguida con el interferómetro confocal FPI100 de la empresa Toptica, con el cual, de acuerdo a la reflectividad con que cuentan sus espejos para longitudes entorno a los 670[nm], tiene una Finesse >400 (típica 1000). Los dos peak del gráfico muestran el estado modal único en que se encuentra el láser utilizado (Láser 2010 EOSI (diodo láser SN00669@70 [mA]) para obtener la señal de interferencia en el FPI confocal. La señal roja muestra la subida de la señal tipo rampa aplicada al interferómetro para su barrido.

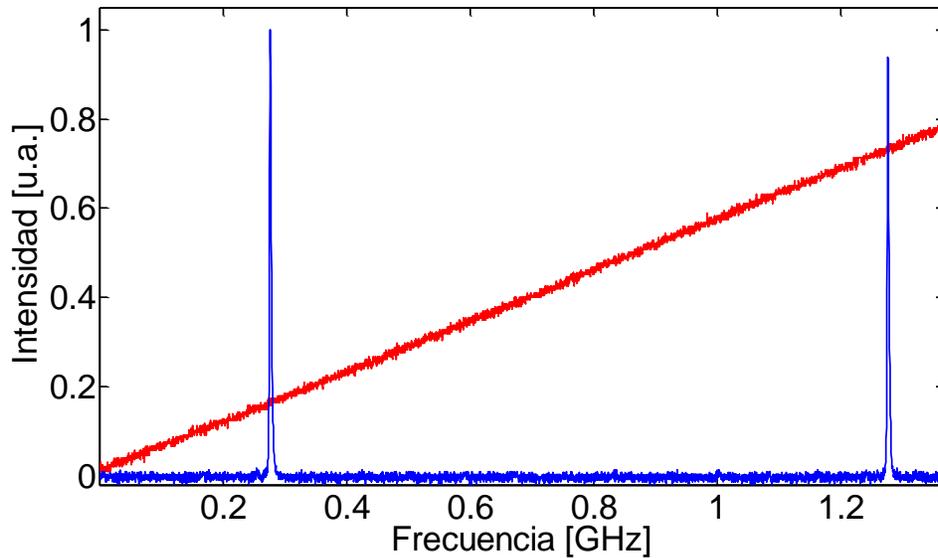


Figura 64. Estado modal que muestra Láser 2010 EOSI (diodo láser SN00669@70 [mA]) mediante FPI FPI100 de la empresa Toptica con rango espectral libre (FSR) de 1 [GHz] y Finesse teórica > 400 dada las especificaciones de fabricante. La Finesse alcanzada es de $F= 312,5$

La Fig.65 muestra la simetría conseguida en los peak de la señal. Se muestra el aumento a uno de los peak de la señal anterior, el cual, indica el grado de exactitud conseguido al intentar posicionar ambos espejos plano cóncavos del interferómetro FPI100 Toptica, es decir, mientras más simétrico el peak, más cercana a la distancia del radio de curvatura de los espejos se está. La distancia requerida es de 75 [mm] (radio de curvatura de los espejos plano cóncavos del FPI confocal).

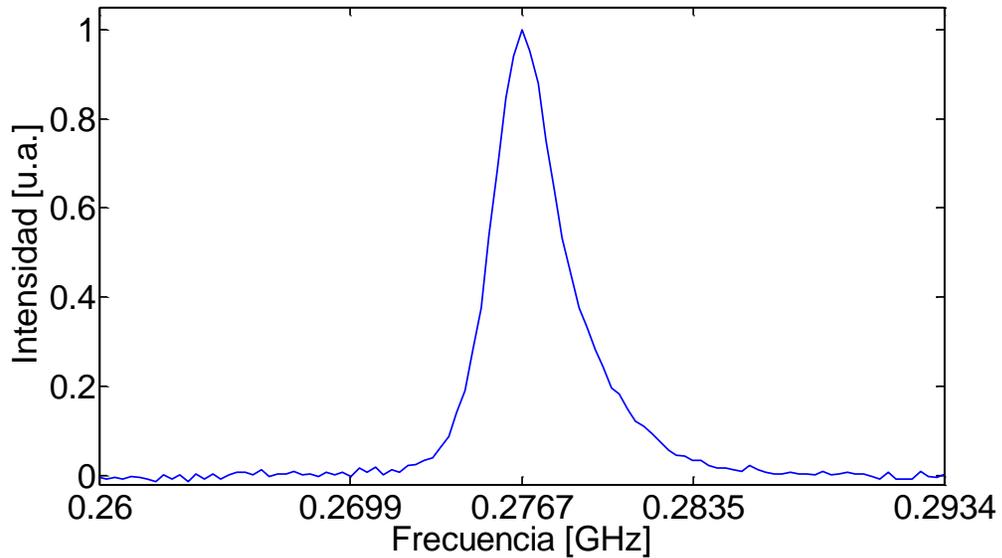


Figura 65. Acercamiento sobre uno de los peaks de la señal de Fig.64, tomado con FPI100 Toptica, que muestra simetría en peak que delata el buen posicionamiento entre espejos. Mientras más simétrico, más exacto es el posicionamiento confocal a conseguir que es la distancia radio de curvatura que para FPI Toptica FPI100 es de 75 [mm].

4.9 Rendimiento de Fabry Perot confocal comercial Burleigh

En la Fig.66 se muestra la señal de interferencia conseguida con el interferómetro construido en el laboratorio, Para este interferómetro, la Finesse debería ser teóricamente $F > 150$ (típica 447) por lo que la figura muestra la máxima Finesse obtenida experimentalmente para este trabajo. Los tres peak del grafico muestran el estado modal único en que se encuentra el láser utilizado (Láser 2010 EOSI (diodo láser SN00669@70 [mA]) para obtener la señal de interferencia en el FPI confocal. La señal roja muestra la subida de la señal tipo rampa aplicada al interferómetro para su barrido.

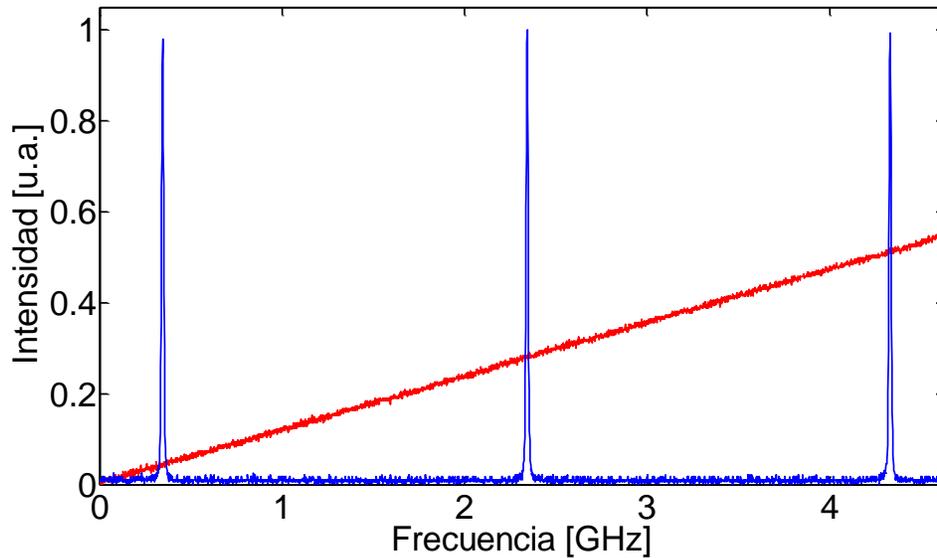


Figura 66. Estado modal que muestra Láser 2010 EOSI (diodo láser SN00669@70 [mA]) mediante FPI Burleigh. La Finesse alcanzada es de $F=115,6$.

La Fig.67 muestra la simetría conseguida en los peak de la señal. Se muestra el aumento a uno de los peak de la señal anterior, el cual, indica el grado de exactitud conseguido al intentar posicionar ambos espejos plano cóncavos del interferómetro confocal de la empresa Burleigh, es decir, mientras más simétrico el peak, más cercana a la distancia del radio de curvatura de los espejos se está. La distancia requerida es de 37,5 [mm] (radio de curvatura de los espejos plano cóncavos del FPI confocal).

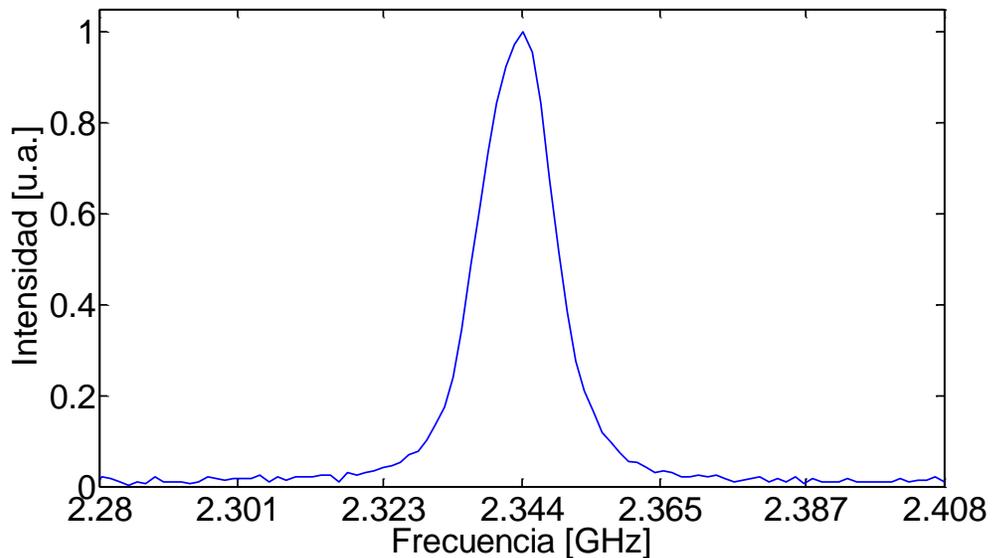


Figura 67. Acercamiento sobre uno de los peak de la señal de Fig.66, tomado con FPI Burleigh, que muestra simetría en peak que delata el buen posicionamiento entre espejos. Mientras más simétrico, más exacto es el posicionamiento confocal a conseguir que es la distancia radio de curvatura que para FPI Burleigh es de 37,5 [mm].

4.10 Resultados de absorción conseguidos en celda de vapor de litio neutro

Los siguientes resultados son la muestra de los datos crudos obtenidos y que son mostrados a continuación de la misma manera a como fueron conseguidos ya que entregan la información relevante para la presentación de datos analizados en donde se asumen valores de distancias en frecuencia entre las distintas líneas del litio. En los siguientes gráficos se muestran las señales de la absorción, el barrido en frecuencia realizado por el láser obtenido con el interferómetro Fabry Perot confocal comercial Burleigh y la señal externa de barrido aplicada al piezoeléctrico interno del Láser 2010 EOSI con el horno Heat Pipe trabajando a 385 [°C]. Estas tres señales se muestran a como fueron obtenidos los datos para las distintas temperaturas que luego se presentan en el análisis de datos.

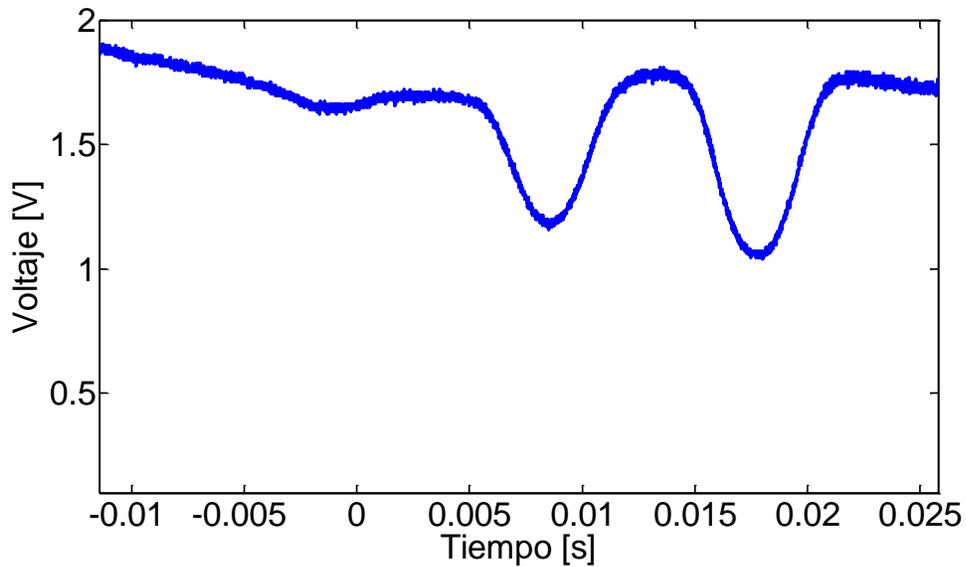


Figura 68. Gráfico de absorción en forma cruda obtenida utilizando Heat Pipe trabajando con una temperatura de operación de 385 [°C] con el Láser 2010 EOSI configurado con valores de operación de $I_{\text{láser}}=45,2$ [mA], $T_{\text{láser}}=23,1$ °C, $PZT_{\text{láser}}=50,41$ [V] y señal de barrido conectado a PZT Mod del controlador láser desde generador de señales, $V=3,62$ [V], $f=11,51$ [Hz] y $\text{Offset}=-0,11$ [V].

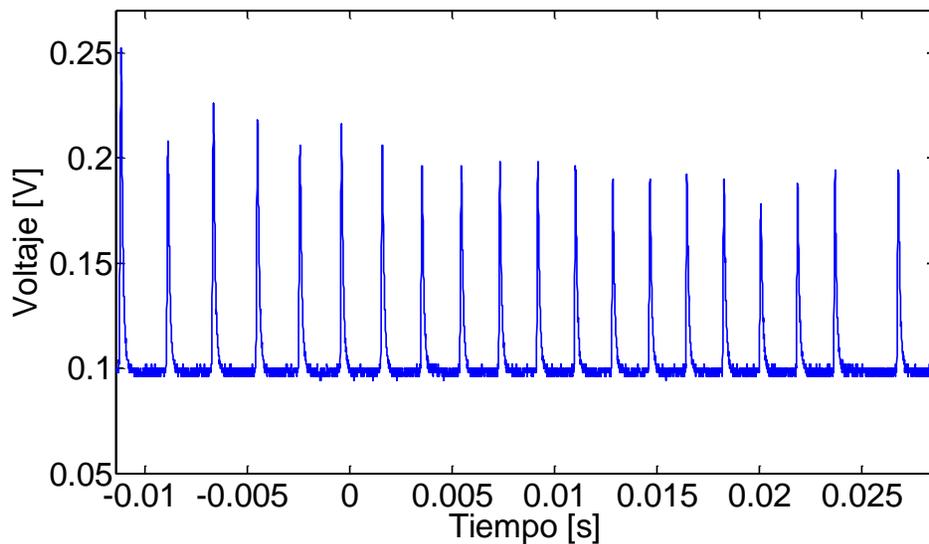


Figura 69. Señal de barrido en frecuencia con Láser 2010 EOSI al obtener absorción en vapor de litio. La señal se obtuvo con FPI confocal comercial (Burleigh, FSR=2 [GHz]). Existen 18 espaciados entre peak consecutivos por lo que el barrido en frecuencia es de una amplitud de 36 [GHz].

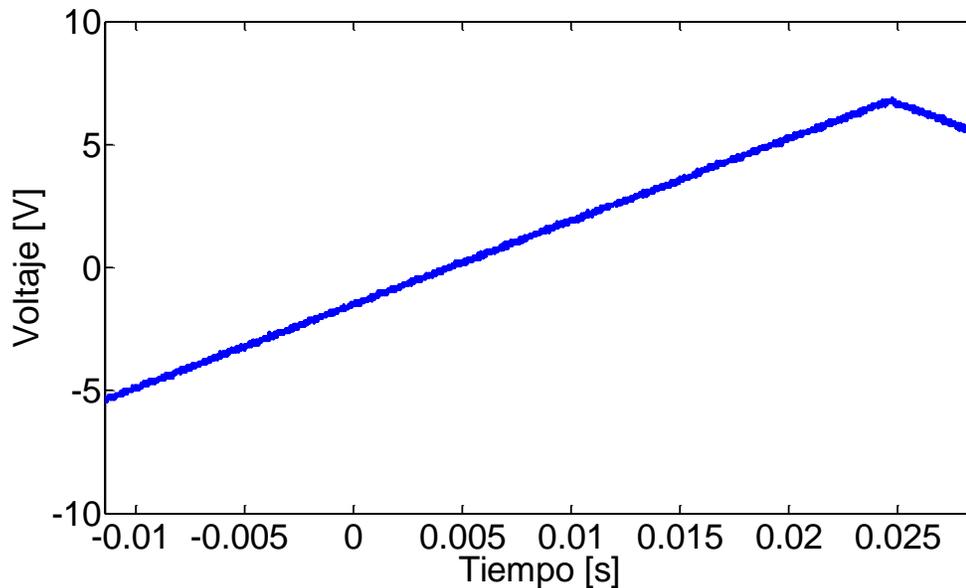


Figura 70. Señal triangular aplicada externamente al piezoeléctrico interno con que trabaja el Láser 2010 EOSI, es decir, independiente de los 50,41 [V] seteados para el piezo, se conecta esta señal a PzT Mod que tiene valores de 3,62 [V], frecuencia de 11,61 [Hz] y Offset de -0,11 [V]. La parte de la señal que sube, es la rampa de subida en donde el láser esta barriendo continuamente en frecuencia.

La Fig.69 que representa el barrido en frecuencia que se realiza con el láser 2010 EOSI, muestra 18 intervalos entre peak y peak por lo que si se considera que entre cada intervalo existe una distancia de 2 [GHz] definido por el rango espectral libre del interferómetro Fabry Perot confocal comercial de la empresa Burleigh, entonces el barrido con que se consiguió la absorción en el vapor de gas de litio neutro, es de al menos 36 [GHz]. Una tabla resumen de los valores de toda la instrumentación con que se logró la absorción se muestra en la tabla 3.

Instrumento	Láser
Marca	EOSI
Modelo	Láser 2010
Variable	Corriente Láser
Denominación	Current
I	45,2 [mA]
IOP	45,0 [mA]
IPD	0,05 [mA]
Variable	Temperatura Láser
Denominación	TEMP
T	23,1 [°C]
LDT	23,0 [°C]
BST	30,2 [°C]
Variable	Calibración
Denominación	CAL
FACT	GRAT 2200
GPIB	4 [nm]
Variable	Longitud de onda
Denominación	Wavelength
F_WL	672,3 [nm]
SET	CTR
Variable	Piezoeléctrico
Denominación	PZT
Voltaje PZT	50,41 [V]
Variable	Intensidad óptica (medición indirecta)
I _{op}	0,015915 [mW/cm ²]

Instrumento	Generador de señales (GS)
Marca	Instek
Modelo	GFG-3015
Tipo señal	Triangular
Voltaje (a PZT Mode)	3,62 [V]
Frecuencia	11,51 [Hz]
Offset	(-) 0,11 [V]

Instrumento	Fotodiodo
Marca	Thorlabs
Modelo	PDA36A-EC Si amplifier
Amplificación	30 dB

Instrumento	Amplificador
Marca	Toptica
Modelo	PDA-S
Amplificación	$\times 2$
Tipo señal	DC
Offset	0 [V]

Instrumento	Osciloscopio
Marca	Tektronix
Modelo	TDS3014-B
CH1	Señal Absorción
CH3	Señal modos
CH4	Señal PZT MOD
Escala CH1	200 mV/div
Escala CH3	50 mV/div
Escala CH4	2 V/div
Escala temporal	4 [ms]

Instrumento	Medidor de vacío
Marca	Varian
Modelo	Multigauge
Vacío	3,5 [Torr]

Instrumento	Interferómetro (FPI)
Marca	Burleigh
FSR	2 [GHz]
Amplificador FPI	DA-100 ,Detector Amplifier
Bandwidth	3 [kHz]
Tipo señal	Invertida

Tabla 3. Valores de cada instrumento con los que se consiguió absorción en gas de litio neutro.

Capítulo 5

Análisis de datos

5.1 Absorción en vapor de Litio neutro

En el experimento de absorción en vapor de litio, existe una línea base, que es la señal que se obtiene cuando no existe absorción en el medio y toda la luz pasa sin absorberse. Cuando no existe absorción se debería captar, mediante el fotodiodo, una línea perfectamente horizontal con un valor distinto de cero. Al hacer una medición cuando no existía absorción en vapor de litio, a una temperatura de 302 [°C], se encontró una señal curva que contiene una señal de fondo que oculta la línea base, como se observa en la señal roja de la Fig.71. Esta señal es ajustable mediante una función Airy. Para encontrar la línea base se realizó la proporción entre las dos señales, la señal roja de la Fig.71 y la función de Airy. Al realizar esta proporción, se encuentra la línea base de la medición mostrada en la Fig.78

Para las mediciones de absorción obtenidas para temperaturas de 432 [°C] , 413 [°C], 385 [°C] ,360 [°C], 336 [°C] y 316 [°C] se hizo la proporción entre la señal de absorción obtenida en cada una de ellas y la función de Airy con que se modeló la señal cuando no hay absorción. De esta forma cada gráfico presentado entre la Fig.72 Fig.77 contiene la línea base que se hace discontinua cuando pasa por frecuencias en que se produce la absorción.

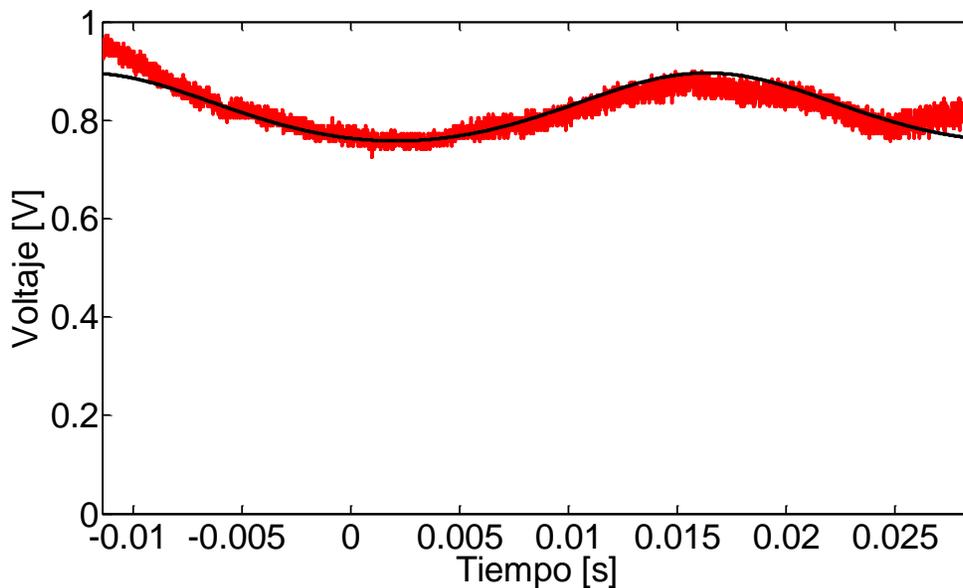


Figura 71. Ajuste de una función de Airy sobre línea base de medición de las absorciones. La línea roja muestra la línea base obtenida a 302 [°C] en donde no existe absorción y la línea negra indica la función de Airy ajustada a línea base

La Fig.71, entrega en color rojo, la señal del experimento cuando no existe absorción en el medio. La línea oscura es una función de Airy que se ajusta a la señal roja experimental. Para la absorción en vapor de litio neutro, para distintas temperaturas, y según la ref.[2] y ref.[3], se estima una distancia aproximada entre peak de absorción de 10,5 [GHz] .Experimentalmente, si se considera que el rango espectral libre del interferómetro es de 2 [GHz] (FSR de FPI Burleigh) y se comparan en la misma escala los gráficos de FPI (función de Airy) y los peak de absorción, entonces se obtiene una distancia de separación de alrededor de 10,5 [GHz]. Desde Fig.72 hasta Fig.78 se muestran los gráficos de las señales de absorción escalados en frecuencia dado el análisis anterior junto con la señal del FPI que puede ser usada como regla comparativa para observar de forma clara la distancia en frecuencia entre cada línea de absorción obtenida en el vapor de litio. Además, estos gráficos se muestran en forma consecutiva

desde la absorción obtenida a más alta temperatura, a 432 [°C], hasta la obtenida a más baja temperatura que corresponde a la línea base de medición.

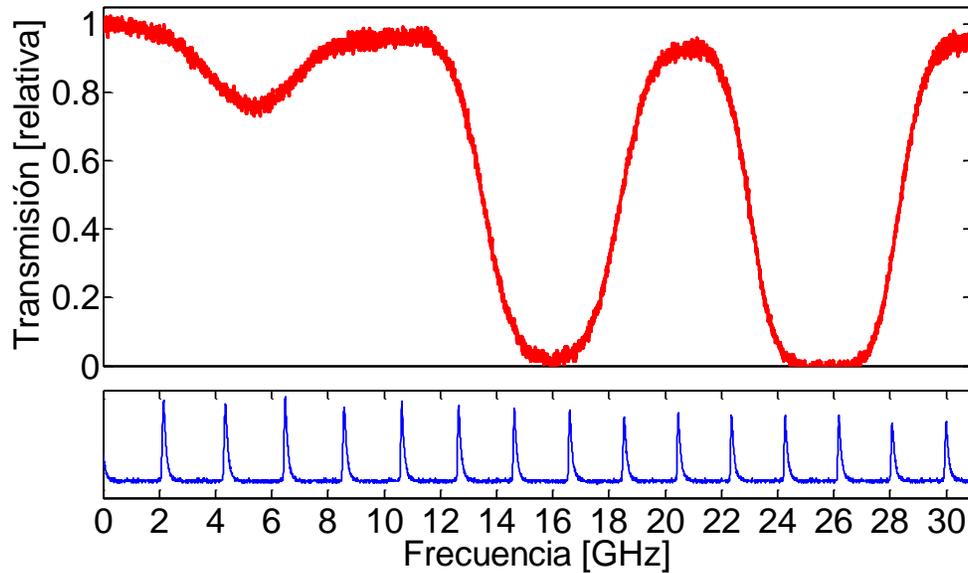


Figura 72. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 432 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{\text{D1}}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{\text{D1}}+{}^6\text{Li}_{\text{D2}}$ (${}^7\text{Li}_{\text{D1}}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{\text{D2}}$.

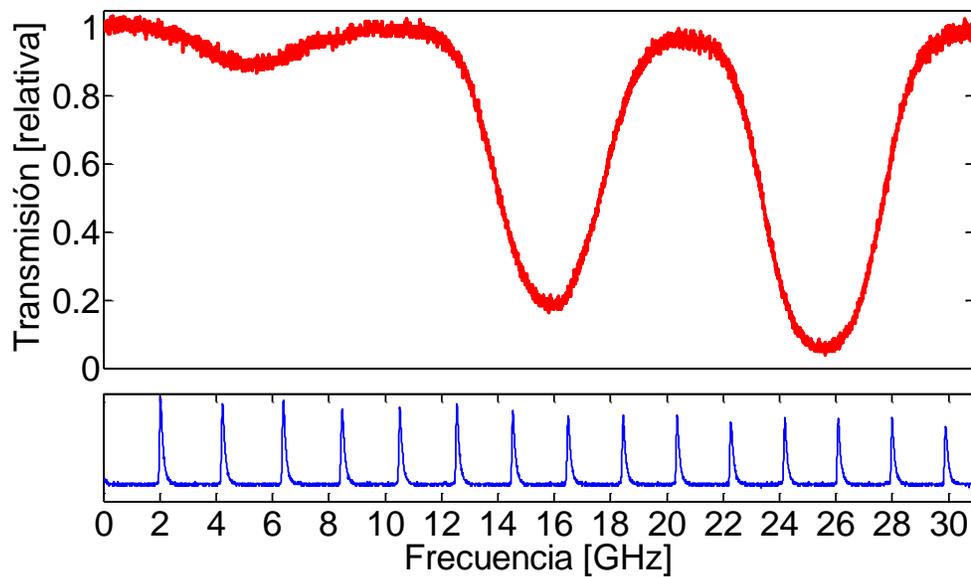


Figura 73. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 413 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{\text{D1}}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{\text{D1}}+{}^6\text{Li}_{\text{D2}}$ (${}^7\text{Li}_{\text{D1}}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{\text{D2}}$.

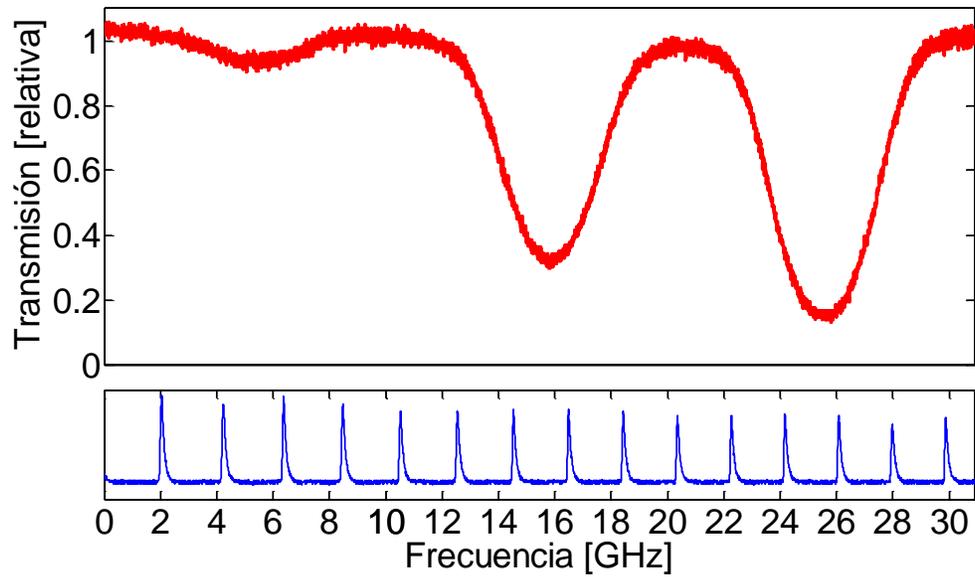


Figura 74. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 385 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{\text{D1}}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{\text{D1}}+{}^6\text{Li}_{\text{D2}}$ (${}^7\text{Li}_{\text{D1}}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{\text{D2}}$.

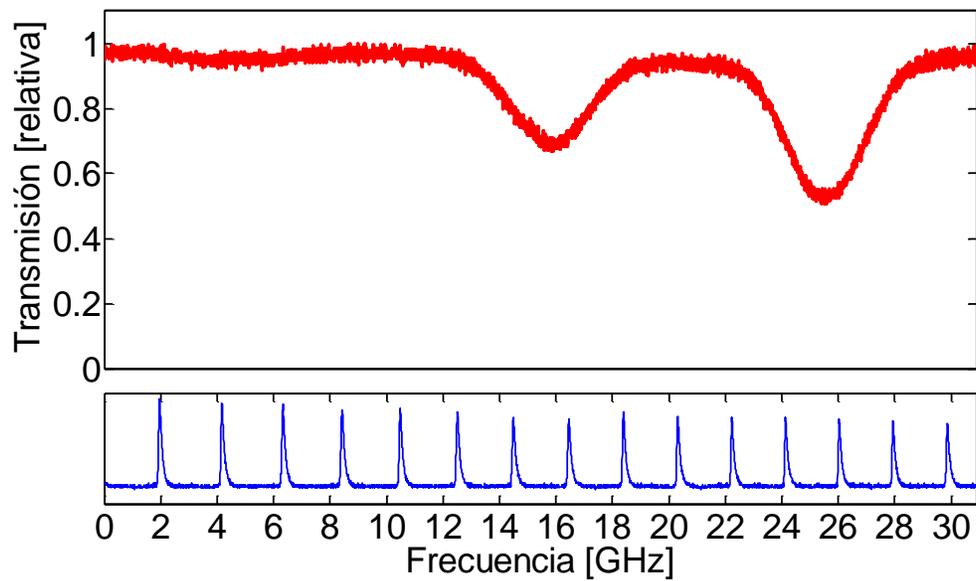


Figura 75. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 360 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{\text{D}1}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{\text{D}1}+{}^6\text{Li}_{\text{D}2}$ (${}^7\text{Li}_{\text{D}1}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{\text{D}2}$.

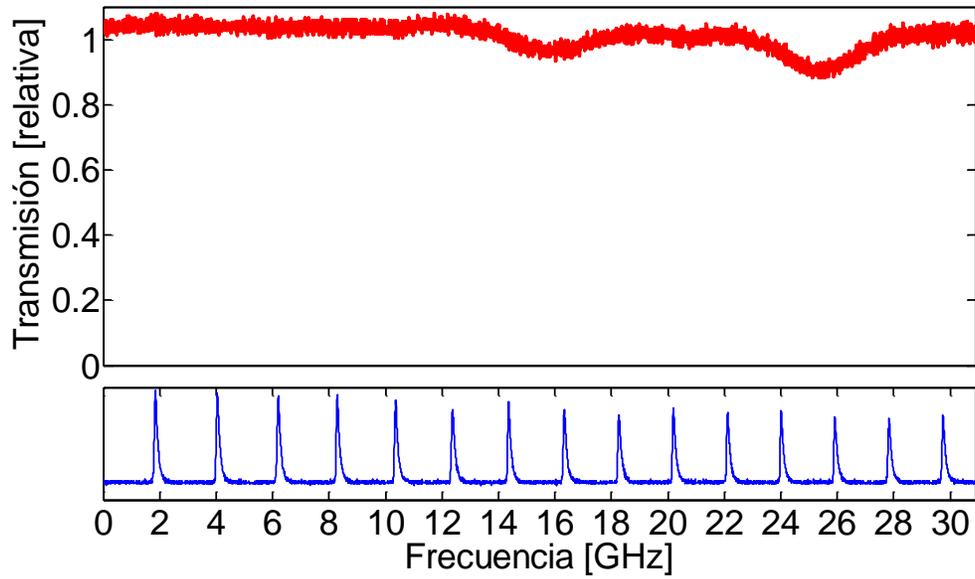


Figura.76. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 336 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{\text{D1}}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{\text{D1}}+{}^6\text{Li}_{\text{D2}}$ (${}^7\text{Li}_{\text{D1}}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{\text{D2}}$.

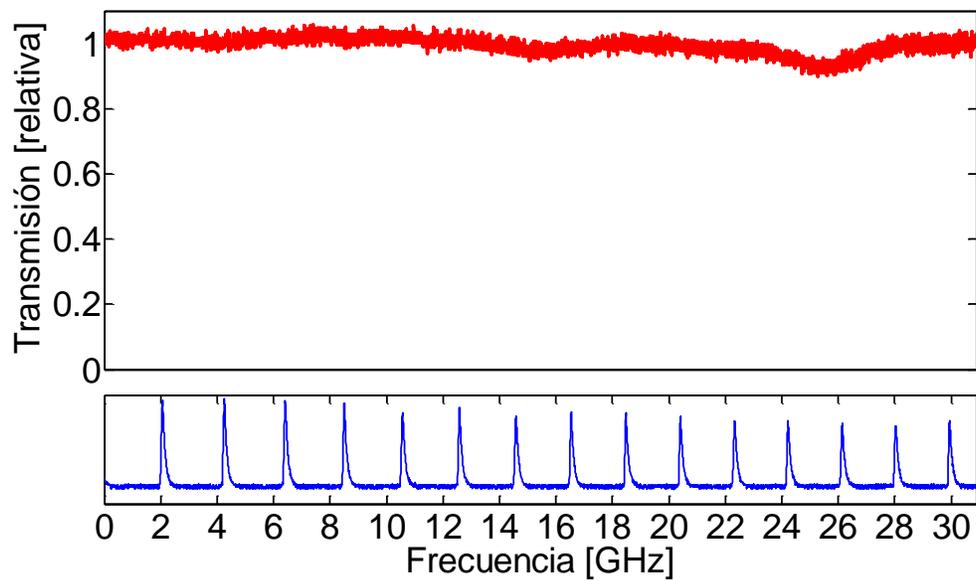


Figura 77. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 316 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{\text{D}1}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{\text{D}1}+{}^6\text{Li}_{\text{D}2}$ (${}^7\text{Li}_{\text{D}1}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{\text{D}2}$.

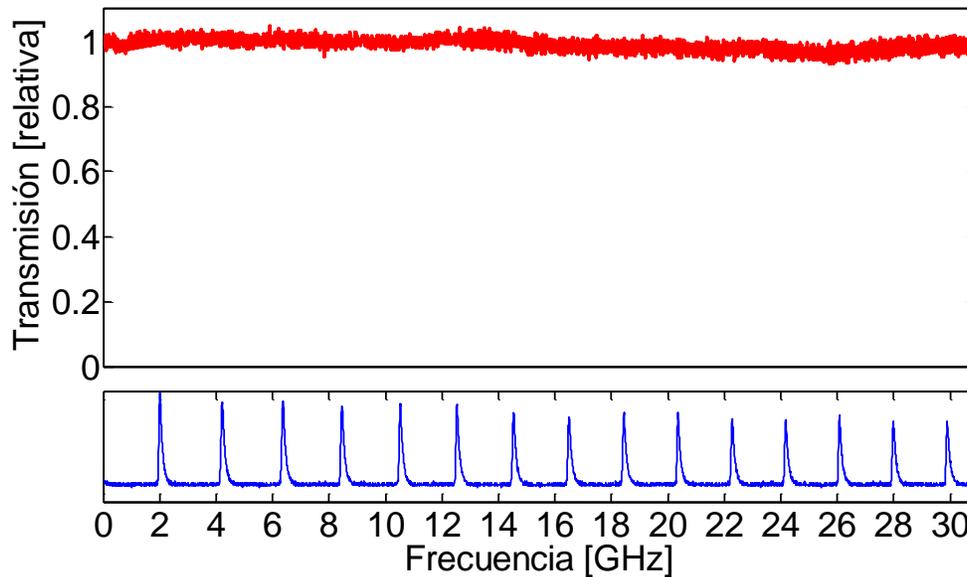


Figura 78. Línea base de la medición de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 302 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]

Si se toman los resultados mostrados desde la la Fig.72 hasta la Fig.78 y se combinan con las estimaciones de densidad realizadas en la Fig.3, en donde se muestra la densidad en términos del número de partículas por unidad de volumen en función de la temperatura del Heat Pipe, entonces se pueden generar una relación entre la densidad de partículas por unidad de volumen en función de la transmisión. Esta relación funcional puede ser utilizada como un gráfico de calibración para saber los niveles de litio y para saber que isótopos del mismo existen dentro de un volumen definido en términos de determinar densidades de esta partícula. La relación entre la densidad de partículas y la transmisión se muestra en la Fig. 79 y como complemento se muestra un gráfico que muestra la relación funcional entre la transmisión y la temperatura del Heat Pipe. Los gráficos son válidos para una intensidad óptica del láser de $I = 0,015915 \text{ [mW/cm}^2 \text{]}$.

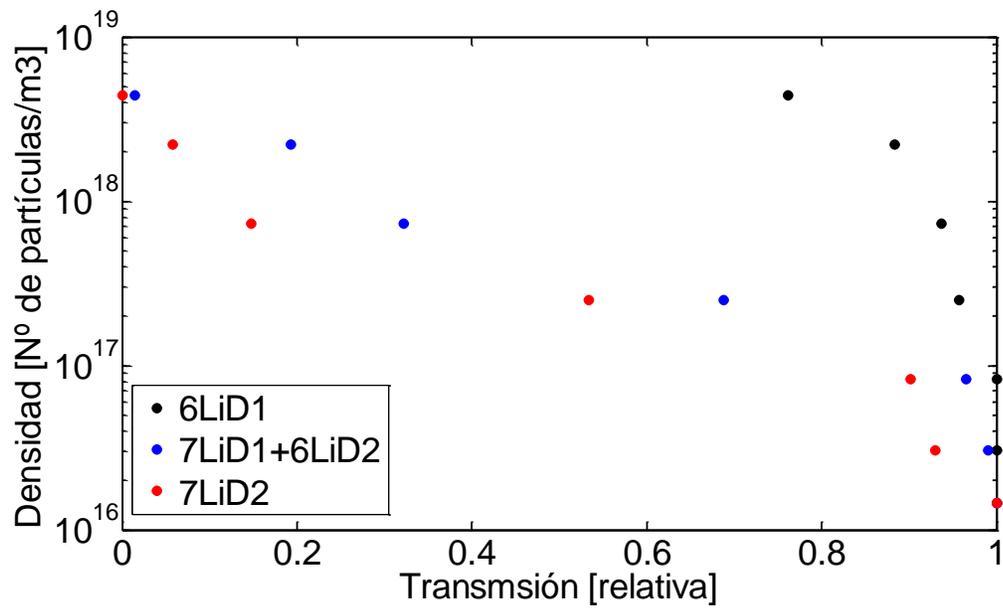


Figura 79. Densidad de partículas por unidad de volumen en función de la transmisión para cada línea de absorción alcanzada utilizando intensidad óptica del Láser EOSI 2010 de $I_{op} = 0,015915 [\text{mW}/\text{cm}^2]$. Los datos de color rojo pertenecen a la línea de absorción ${}^7\text{Li}_{D2}$, los de color azul pertenecen a ${}^7\text{Li}_{D1}+{}^6\text{Li}_{D2}$ y los de color negro pertenecen a ${}^6\text{Li}_{D1}$.

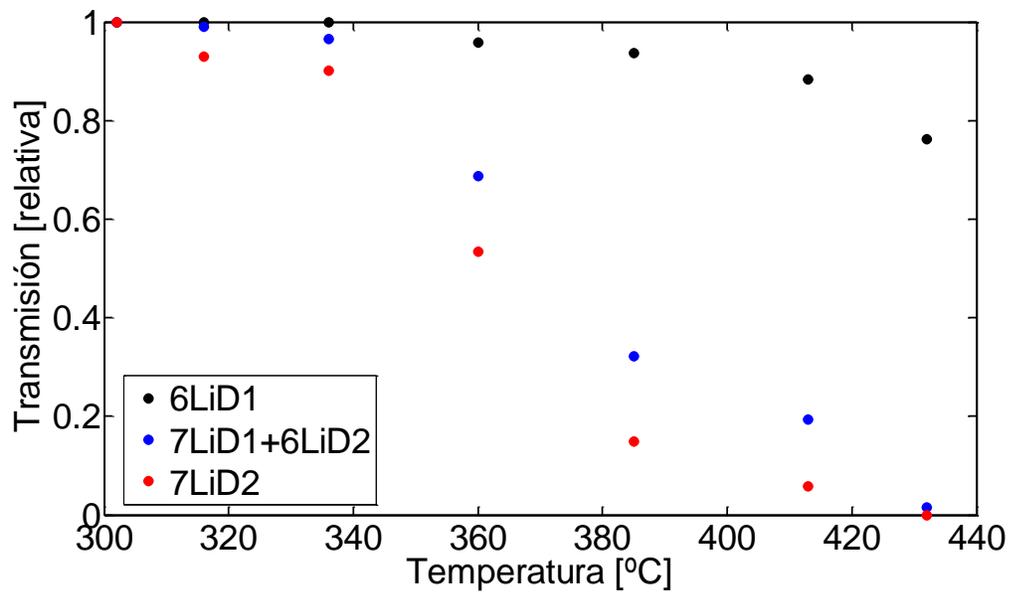


Figura 80. Transmisión en función de la temperatura aplicada en Heat Pipe para cada línea de absorción alcanzada utilizando intensidad óptica del Láser EOSI 2010 de $I_{op} = 0,015915 \text{ [mW/cm}^2 \text{]}$. Los datos de color rojo pertenecen a la línea de absorción ${}^7\text{LiD}_2$, los de color azul pertenecen a ${}^7\text{LiD}_1+{}^6\text{LiD}_2$ y los de color negro pertenecen a ${}^6\text{LiD}_1$.

Capítulo 6

Discusión

El horno tipo Heat Pipe (celda), logró rangos de temperaturas suficientes para conseguir resultados de absorción de litio junto al láser comercial con cavidad Littman Metcalf de la empresa EOSI. Con este último, se logró un barrido suficiente para conseguir absorción en las líneas del litio que se encuentran entorno a la longitud de onda 670 [nm]. Dado lo anterior, fue observable que para conseguir absorción en vapor de litio neutro, la celda de calibración a construir o poner en marcha, debe contar con temperaturas sobre los 302 [°C] para la correcta evaporación de una muestra de litio, y para el láser a utilizar, es crítico que logre un barrido de al menos 30 [GHz], puesto que las líneas del litio, cubren un rango en frecuencia de esa magnitud. En este sentido, la construcción del FPI confocal logró ser funcional pero el láser y horno de construcción propia para la evaporación del litio, están en fase de estudio para mejorar sus características. El horno para litio construido, necesita generar mayor temperatura para elevar aún más la temperatura de la muestra, y el láser construido, debe poder conseguir un barrido de 30 [GHz], es decir, unas 8 veces el barrido máximo conseguido mediante el piezoeléctrico de disco C5500 (Lead zirconate titanate). El láser EOSI, que cuenta con un diodo láser que estuvo en desuso al menos 15 años mostró que un diodo láser puede trabajar después de esa cantidad de tiempo sin degradarse. Para la celda Heat Pipe se demostró que es posible trabajar con gas de Helio como gas buffer, por lo que se prueba que es posible usarlo como opción al gas de Argón, el cual, es el único gas que especifica el fabricante del horno. Para la absorción en gas de litio neutro, es posible conseguir la línea base de la señal de absorción, ajustando la señal de fondo mediante una función de Airy. En definitiva, se puso en marcha una celda de calibración (Heat Pipe) para láseres en base al uso de vapor de litio neutro, lográndose obtener valores base y críticos de funcionamiento para la celda y para láser EOSI 2010.

Capítulo 7

Conclusión

Se logró evaporar una muestra de litio mediante la puesta en marcha de una celda u horno tipo Heat Pipe con la que se logró obtener un vapor de litio neutro para la calibración de un láser comercial (Láser 2010 EOSI). La celda probó ser funcional dado que se pudo obtener la absorción de la luz del láser, previa sintonización de este con la celda en funcionamiento, de forma controlada para distintas temperaturas, pudiéndose detectar las magnitud de temperatura a la que se comienza a generar el vapor de litio y las temperaturas a las que comienzan a observarse las distintas líneas de absorción con que cuenta el litio (frecuencias de resonancia). Por su lado, se pudieron caracterizar los valores del láser comercial EOSI con cavidad Littrow utilizando en su interior el diodo láser SN00660@70mA con una antigüedad de 15 años sin degradación de sus capacidades.

La celda en funcionamiento es capaz entonces de ser utilizada para la sintonización de un láser que emita entorno a los 670 [nm], con un barrido en frecuencia de alrededor de 30 [GHz], para que sea posible, absorber en las tres frecuencias de resonancia con que cuenta el vapor de litio neutro entorno a esa longitud. La evaluación del uso o aplicación industrial de este trabajo de puesta en marcha de una celda de calibración y sintonización de láseres para que emitan en las frecuencias de resonancia del litio, apunta a generar técnicas para desarrollar celdas de calibración más compactas que se puedan trasladar hacia cualquier recinto en donde se desee medir un vapor contaminante dentro del ambiente, ya que es posible utilizar celdas de este tipo para generar vapor, llevarlo a terreno para calibrar el láser y generar mediciones de absorción de láseres sintonizados dentro de ciertas distancias, para así, poder medir densidades de vapor de sustancias indeseadas.

Referencias

- [1] K. B. MacAdam, A. Steinbach, and C. Wieman, A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb, *Am.J.Phys.*60, 1098-1111 (1992)
- [2] Adra V. Carr, Yancey H. Sechrest, Scott R. Waitukaitis, John D. Perreaulta, Vincent P.A. Lonij and Alexander D. Cronin, Cover slip external cavity diode laser, arXiv:0708.0014v2 [physics.optics] , 2007
- [3] I. E. Olivares and A. E. Duarte, T. Lokajczyk, A. Dinklage, F. J. Duarte, Doppler-free spectroscopy and collisional studies with tunable diode lasers of lithium isotopes in a heat-pipe oven, *J. Opt. Soc. Am. B/ Vol. 15*, 1998
- [4] T. Hof, D. Fick, H.J. Jansch, Application of diode lasers as a spectroscopic tool at 670 nm, *Optics Communications* 124, 283- 286 (1996)
- [5] A. Dinklage, T. Lokajczyk and H. J. Kunze, B. Schweerb), I. E. Olivares, In situ density measurement for a thermal lithium beam employing diode lasers, *Rev. Sci. Instrum.* 69, 1998
- [6] Adra Victoria Carr , Thesis :Hyperfine Studies of Lithium Vapor using Saturated Absorption Spectroscopy, University of Arizona, 2007
- [7] Michael E. Gehm, Properties of ^6Li , <http://Steck.us/alkalidata/>, 2003
- [8] Kevin S. Repasky, Amin R. Nehrir, Justin T. Hawthorne, Gregg W. Switzer, and John L. Carlsten, Extending the continuous tuning range of an external-cavity diode laser, *Applied Optics* Vol. 45, 2006
- [9] Lance A. Glasser, A Linearized Theory for the Diode Laser in an External Cavity, *IEEE Journal of Quantum Electronics* Vol. QE-16, 1980
- [10] Confocal Fabry Perot Cavity: Seung-Hyun Lee SUNY at Stony Brook Optics Rotation Project for Fall 2001, Advisors: Professor, Harold Metcalf <http://laser.physics.sunysb.edu/~sellee/presentation2.pdf>
- [11] Colin D. Fletcher_ and Chad Orzelb, “Construction and calibration of a low cost Fabry-Perot interferometer for spectroscopy experiments”, *Am. J. Phys.* 73, 2005
- [12] A. O. Sushkov, and D. Budker, Production of long-lived atomic vapor inside high-density buffer gas, arXiv:0708.1743v2 [physics.atom-ph], 2008

[13] Lide D.R. (ed.) CRC Handbook of chemistry and physics, 84 ed., CRC, page 805 (2004)

Índice de Figuras

Capitulo 1

Figura 1. Primera configuración de mecanismo para elevar temperatura de muestra de Al-Li.....	10
--	----

Capítulo 2

Figura 2. Se observa la línea de tendencia que muestra de forma suave como aumenta la presión de vapor del sistema a medida que sube la temperatura de una muestra de litio una vez que ya está en fase líquida. Los puntos azules muestran algunas de las temperaturas importantes para el experimento de absorción con que se conforma la curva (302 [°C], 316 [°C], 336 [°C], 360 [°C], 385 [°C], 413 [°C] y 432 [°C]). Las mediciones de absorción entregan directamente la información acerca de la densidad molar o directamente la cantidad de partículas por unidad volumétrica.....	13
---	----

Figura 3. Número de partículas por cada m ³ que se alcanza para temperaturas de una muestra de litio entre 300 [°C] y 440 [°C] dentro de un horno o celda de litio. Los puntos azules resaltan algunos de los valores con que se conforma el gráfico y que son relevantes para el experimento de absorción (302 [°C], 316 [°C], 336 [°C], 360 [°C], 385 [°C], 413 [°C] y 432 [°C]). Se observa el aumento de partículas/m ³ a medida que aumenta la temperatura y por consiguiente, la presión de vapor.....	14
---	----

Figura 4. Estructura de capas de un diodo láser y sus modos de oscilación.....	16
---	----

Figura 5. Contribuciones de variables en la ganancia del diodo láser.....	18
--	----

Figura 6. Difracción sobre una ranura de una red de difracción.....	21
--	----

Figura 7. Incidencia sobre dos ranuras de una red de difracción.....	21
Figura 8. Condición $\alpha = \beta$ para la red, condición para cavidad Littrow.....	21
Figura 9. Cavidad Littman Metcalf externa del diodo láser.....	22
Figura 10. Esquema punto pivote cavidad Littman Metcalf.....	25
Figura 11. Esquema de condición confocal para dos espejos plano cóncavos para la formación de un FPI confocal.....	26
Figura 12. Configuración de alineación con condición confocal de dos espejos plano cóncavos para la formación de un FPI confocal que muestra proceso de interferencia de los haces dentro de la cavidad.....	27
Figura 13. Instrumentación y conexión experimental básica para la medición con FPI confocal.....	27
Figura 14. Señal de un interferómetro comercial Fabry Perot confocal cuando el espaciado entre espejos de la cavidad tiene una diferencia de 1[mm] respecto a una distancia de radio de curvatura, condición de un FPI confocal	28
Figura 15. Señal de un interferómetro comercial Fabry Perot confocal cuando el espaciado entre espejos de la cavidad tiene una diferencia de 0,6 [mm] respecto a una distancia de radio de curvatura, condición de un FPI confocal.....	29
Figura 16. Señal de un interferómetro comercial Fabry Perot confocal cuando el espaciado entre espejos de la cavidad tiene una diferencia de 0,15 [mm] respecto a una distancia de radio de curvatura, condición de un FPI confocal.	29

Figura 17. Señal de interferómetro comercial Fabry Perot confocal cuando el espaciado entre espejos de la cavidad es cercano al radio de curvatura en forma casi exacta, condición de un FPI confocal. Se muestra también *FSR* Y *FWHM*.30

Capítulo 3

Figura 18. Montura primer espejo de FPI con descripción numérica de sus perforaciones interiores y exteriores.36

Figura 19. Montura primer espejo de FPI con medidas de construcción y vista de posicionamiento de piezoeléctrico con espejo plano cóncavo de radio de curvatura 25 [mm] luego de lograr su unión mediante epoxi. Todas las medidas de la figura están en [mm].....36

Figura 20. Vista lateral y frontal, en la parte superior de la figura, de pieza que actúa como guía para montura de segundo espejo ya que cuenta con hilo M20-0,5. La montura del segundo espejo de FPI se muestra en la parte inferior de la figura con sus vistas lateral y frontal. Ambas estructuras se muestran con sus medidas de construcción. Todas las medidas de la figura están en [mm].39

Figura 21. Vista de la placa 1. Esta es la entrada en donde ingresa el haz al interferómetro (FPI). La figura muestra sus medidas de fabricación. Todas las medidas de la figura están en [mm].42

Figura 22. Vista de la placa 1. Esta es la salida del interferómetro, es por esto que cuenta con un agujero más grande que la entrada para posicionar frente de él un fotodiodo que capte la luz de salida. La figura muestra sus medidas de fabricación. Todas las medidas de la figura están en [mm].43

Figura 23. Vista superior y lateral más ancha de la base del interferómetro. Esta base cuenta con las medidas de todos los agujeros que permiten soportar las placas o tapas en forma de “T” y la tapa en “U” que posteriormente cierra el sistema. Además cuenta con dos acanalados para fijar esta base sobre un banco óptico. Todas las medidas de la figura están en [mm].	44
Figura 24. Vista complementaria de la base del interferómetro. Ésta, es la vista lateral más angosta de la base y entrega información acerca de sus medidas de construcción todas en [mm].	45
Figura 25. Medidas y grosor de 5 [mm] de las tres placas de aluminio con que se construye la tapa tipo “U” para el interferómetro Fabry Perot. Todas las medidas de la figura están en [mm]......	45
Figura 26. La imagen a) muestra la parte posterior del FPI, lugar en donde se posiciona el fotodiodo. Además se aprecia la conexión BNC de alto voltaje utilizada en el interferómetro. En b) se muestra la entrada 2 [mm] del FPI. En c) se observa una vista superior e interior del montaje del interferómetro en donde se identifican la montura del espejo 1 y la del espejo 2 que regula de manera gruesa la distancia. En d) se aprecia una vista panorámica del FPI terminado y adosado al banco óptico.	46
Figura 27. Posicionamiento de los dos bloques del sistema láser. El bloque mayor que actúa de sumidero y el bloque pequeño, por encima de el, que actúa de soporte de todo el sistema óptico en configuración Littrow. Entre ellos se observa el posicionamiento del Peltier que permite el control de la temperatura del sistema, y con esto, su aporte a la estabilidad de la emisión del diodo láser. Todas las medidas de la figura están en [mm]......	49

Figura 28. Vista lateral del bloque mayor que actúa de sumidero junto a sus medidas de construcción. Todas las medidas de la figura están en [mm].....49

Figura 29. Vista lateral del bloque menor o pequeño que soporta el sistema óptico en configuración Littrow junto a sus medidas de construcción. Todas las medidas de la figura están en [mm].....50

Figura 30. Vista superior del sistema láser construido. Se aprecia el posicionamiento de los 2 bloques del sistema láser y sus respectivas medidas de construcción. Estos bloques son el bloque mayor que actúa de sumidero de temperatura y el bloque pequeño que soporta el sistema óptico en configuración Littrow. Todas las medidas de la figura están en [mm].50

Figura 31. Diseño del aislante de PVC que se coloca para la aislación del tornillo del bloque mayor junto a sus medidas de construcción .El aislante de PVC esta diseñado para tornillo #8-32 1 ½” que permite ensamblar a bloque pequeño con el bloque grande en el sistema láser construido. Todas las medidas de la figura están en [mm].....51

Figura 32. Sistema opto-mecánico cavidad Littrow para Láser. Todas las medidas de la figura están en [mm].52

Figura 33. Información complementaria acerca de la altura de fabricación del agujero con avellanado para la montura en “U” que permite la inserción de un tornillo de sujeción a la montura KMS de medida #4-40. La fabricación de este agujero esta denominado con el número 6 siguiendo la secuencia de definición de la Fig.32, esto permite, indicar las características más detalladamente en lectura principal. Todas las medidas de la figura están en [mm].....52

Figura 34. Vista Superior de base pequeña que contiene sistema óptico.....54

Figura 35. Base tipo “T”, junto a sus medidas de construcción, que soporta al cilindro de fabricación propia que sostiene al sistema socket-diodo láser, lente esférico. Todas las medidas de la figura están en [mm]. Agujero para TH10K no se representa en la figura.....55

Figura 36. Cuerpo principal de cilindro, de fabricación propia en laboratorio, que soporta un sistema óptico compuesto por cualquier diodo láser de 9 [mm] de diámetro y un lente esférico $f=4,5$ [mm] (Thorlabs, modelo C230TM). Lo anteriormente descrito se distribuye de izquierda a derecha en la imagen. Todas las medidas de la figura están en [mm].....55

Figura 37. Vista lateral y frontal de tapa de cilindro de fabricación propia. Esta tapa es atornillada al cilindro con el fin de sostener y centrar el socket (Thorlabs, modelo S8060) que se conecta al diodo láser ,y a la vez , circunscribir y centrar al diodo láser en el cuerpo cilíndrico. Su posición y atornillado en el cilindro principal es en la parte posterior de éste. La parte posterior del cilindro es el extremo izquierdo de la Fig.36. Todas las medidas de la figura están en [mm].....56

Figura 38. Vista frontal y lateral de base tipo “T” de fabricación propia junto a medidas de construcción .Su diseño esta realizado para que sostenga un tubo LT230P-B capaz de sostener un lente esférico de $f=4,5$ [mm] y diodos de 5,6 y 9 [mm]. Todas las medidas de la figura están en [mm]. Agujero para TH10K no se representa en la figura.56

Figura 39. Placa 1 (P1) soporta mediante cuatro perforaciones de 3 [mm] el circuito de protección de corriente del diodo láser. Además cuenta con dos perforaciones rectangulares. La perforación rectangular más elevada en la figura indica el punto donde se posiciona la conexión para el controlador de corriente del diodo láser LDC205 (Thorlabs) .La perforación rectangular más baja en la figura indica el punto de salida del haz láser. Todas las medidas de la figura están en [mm].59

Figura 40. Placa 2 (P2) cuenta con perforación para conector tipo BNC para entrada de señal de barrido de piezoeléctrico, y una perforación rectangular, para posicionamiento de conector de 9 pines (macho) correspondiente al controlador de temperatura TED 200 (Thorlabs) del sistema láser. Todas las medidas de la figura están en [mm].60

Figura 41. Placa lateral de acrílico para tapa tipo “U” para sellado de sistema láser. Se fabrican dos de estos modelos y se unen a la placa superior de la Fig.42. Todas las medidas de la figura están en [mm].61

Figura 42. Placa superior para tapa tipo “U” de acrílico para sellado de sistema láser. Todas las medidas de la figura están en [mm].62

Figura 43. Vista superior del láser con las piezas básicas montada. Se observa la salida del haz al escoger una red de difracción de 1200 [líneas/mm] para longitudes de onda entorno a los 750 [nm].Al usar esta red con $\lambda = 670$ [nm], se define un ángulo $\alpha = 23,74^\circ$ entre la red y la salida de la luz.....64

Figura 44. Circuito de protección para diodo láser y la conexión de este con distintos tipos de diodo con la misma configuración y polaridad AG. En a) se muestran los mismos tipos de conexiones que para b) pues existe el mismo tipo de polaridad para todos los casos, sólo cambia, la configuración física de los terminales de los diodos utilizados en cada uno de los casos, que son detallados en las figuras.....	65
Figura 45. Vista final del láser sintonizable fabricado.....	67
Figura 46. Vista principal de primera configuración de sistema de vacío diseñado para evaporación de litio desde una muestra de aleación Al-Li. La denominación S # significa Salida y el número de la salida.	71
Figura 47. Vista lateral Este primera configuración de sistema de vacío diseñado para evaporación de litio desde una muestra de aleación Al-Li.	71
Figura 48. Vista lateral Oeste de la primera configuración de sistema de vacío diseñado para evaporación de litio desde una muestra de aleación Al-Li.....	72
Figura 49. Diseño de camisa para sujeción de muestra Al-Li para generación de vapor de Litio. Esta camisa que sostiene la muestra es colocada en la primera configuración para sistema de evaporación de muestra de Al-Li .Su posicionamiento se puede observar en la Fig.46. Todas las medidas de la figura están en [mm].....	72
Figura 50. Vista real del horno de ladrillos refractarios terminado. Su posicionamiento en el sistema de evaporación se puede visualizar en la Fig.46.....	75
Figura 51. Sistema de enfriamiento para sistema Heat Pipe. Las líneas discontinuas en la entrada y salida indicadas las abrazaderas que deben ir en cada manguera.....	77

Figura 52. Vista real de sistema Heat Pipe terminado. En la figura se aprecia en la imagen de la izquierda, el cuerpo principal del Heat Pipe, el cual muestra la cámara de vacío (tubo de acero con ventanas para alta temperatura) y el horno cerámico que lo cubre en la parte exterior. En la imagen de la derecha se puede apreciar el sistema de enfriamiento terminado y posicionado en el laboratorio.....79

Figura 53. Esquema para disponer los elementos ópticos y de medición en el banco óptico para realizar el análisis de cada láser disponible en términos de potencia, estabilidad y barrido.....80

Figura 54. Tipo de piezoeléctrico de disco delgado usado para formar una unidad piezoeléctrica para barrido.....82

Figura 55. Disco piezoeléctrico C-5500 (Lead zirconate titanate) que muestra la dirección de estiramiento y contracción en que se usó.83

Figura 56. Vista esquemática del montaje experimental principal realizado para obtener la absorción en vapor de litio.....86

Capítulo 4

Figura 57. Comportamiento en potencia con que cuenta el Láser 2010 EOSI, utilizado en la absorción en vapor de litio neutro.88

Figura 58. Comportamiento en potencia del diodo láser TOLD 9221M instalado en el sistema láser construido en el laboratorio.89

Figura 59. Barrido logrado con piezoeléctricos de disco delgado instalado en módulo láser aplicándoles señal triangular de +700 [V] peak to peak .Barrido fue analizado mediante un FPI confocal comercial Burleigh con un FSR= 2 [GHz]. La señal roja representa la subida de la rampa y la señal azul representa el barrido.....90

Figura 60. Barrido logrado por piezoeléctrico C-5500 en módulo láser de construcción propia aplicándole señal triangular de +1000 [V] peak to peak. Barrido fue analizado mediante un FPI confocal comercial Burleigh con un FSR= 2 [GHz]. La señal roja representa la subida de la rampa y la señal azul representa el barrido.91

Figura 61. Barrido del láser 2010 EOSI con piezo interno. El Interferómetro usado para obtener esta señal fue un FPI Burleigh con un rango espectral libre (FSR) de 2 [GHz]. La señal aplicada al piezoeléctrico interno es de 50,41 [V], usando el láser con corriente $I_{\text{Láser}}=45,2$ [mA] y $T=23,1$ [°C].La señal externa para su barrido fue una señal triangular de $V=3,61$ [V] de frecuencia $f=11,51$ [Hz] y offset de -0,11 [V] . La señal roja representa la subida de la rampa y la señal azul representa el barrido.....93

Figura 62. Estado modal del láser HL6714G (Hitachi) obtenido mediante el FPI confocal construido en laboratorio para este trabajo. Representación de uno de los mejores rendimientos que se obtuvieron del FPI construido a partir de espejos plano cóncavos de radio curvatura 25 [mm] y reflectividad del 99,5%. con rango espectral libre FSR=3 [GHz] y Finesse teórica $F= 626,74$. En esta medición se alcanza una Finesse $F=131,23$94

Figura 63. Acercamiento sobre uno de los peak de la señal de Fig.62, tomado con FPI construido, que muestra simetría en peak que delata el buen posicionamiento entre espejos. Mientras más simétrico, más exacto es el posicionamiento confocal a conseguir (FPI construido es de 25 [mm]).....95

Figura 64. Estado modal que muestra Láser 2010 EOSI (diodo láser SN00669@70 [mA]) mediante FPI FPI100 de la empresa Toptica con rango espectral libre (FSR) de 1 [GHz] y Finesse teórica > 400 dada las especificaciones de fabricante. La Finesse alcanzada es de $F= 312,5$ 96

Figura 65. Acercamiento sobre uno de los peaks de la señal de Fig.64, tomado con FPI100 Toptica, que muestra simetría en peak que delata el buen posicionamiento entre espejos. Mientras más simétrico, más exacto es el posicionamiento confocal a conseguir que es la distancia radio de curvatura que para FPI Toptica FPI100 es de 75 [mm].....97

Figura 66. Estado modal que muestra Láser 2010 EOSI (diodo láser SN00669@70 [mA]) mediante FPI Burleigh. La Finesse alcanzada es de $F=115,6$98

Figura 67. Acercamiento sobre uno de los peak de la señal de Fig.66, tomado con FPI Burleigh, que muestra simetría en peak que delata el buen posicionamiento entre espejos. Mientras más simétrico, más exacto es el posicionamiento confocal a conseguir que es la distancia radio de curvatura que para FPI Burleigh es de 37,5 [mm].....99

Figura 68. Gráfico de absorción en forma cruda obtenida utilizando Heat Pipe trabajando con una temperatura de operación de 385 [°C] con el Láser 2010 EOSI seteado con valores de operación de , $I_{\text{láser}}=45,2$ [mA], $T_{\text{láser}}=23,1$ °C, $PZT_{\text{láser}}=50,41$ [V] y señal de barrido conectado a PZT Mod del controlador láser desde generador de señales, $V=3,62$ [V], $f=11,51$ [Hz] y Offset=-0,11 [V].....100

Figura 69. Señal de barrido en frecuencia con Láser 2010 EOSI al obtener absorción en vapor de litio. La señal se obtuvo con FPI confocal comercial (Burleigh, FSR=2 [GHz]). Existen 18 espaciados entre peak consecutivos por lo que el barrido en frecuencia es de una amplitud de 36 [GHz].100

Figura 70. Señal triangular aplicada externamente al piezoeléctrico interno con que trabaja el Láser 2010 EOSI, es decir, independiente de los 50,41 [V] seteados para el piezo, se conecta esta señal a PzT Mod que tiene valores de 3,62 [V], frecuencia de 11,61 [Hz] y Offset de -0,11 [V]. La parte de la señal que sube, es la rampa de subida en donde el láser esta barriendo continuamente en frecuencia.....101

Capítulo 5

Figura 71. Ajuste de una función de Airy sobre línea base de medición de las absorciones. La línea roja muestra la línea base obtenida a 302 °C en donde no existe absorción y la línea negra indica la función de Airy ajustada a línea base.....105

Figura 72. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 432 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{D1}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{D1}+{}^6\text{Li}_{D2}$ (${}^7\text{Li}_{D1}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{D2}$106

Figura 73. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 413 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{\text{D1}}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{\text{D1}}+{}^6\text{Li}_{\text{D2}}$ (${}^7\text{Li}_{\text{D1}}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{\text{D2}}$107

Figura 74. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 385 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{\text{D1}}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{\text{D1}}+{}^6\text{Li}_{\text{D2}}$ (${}^7\text{Li}_{\text{D1}}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{\text{D2}}$108

Figura 75. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 360 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{\text{D1}}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{\text{D1}}+{}^6\text{Li}_{\text{D2}}$ (${}^7\text{Li}_{\text{D1}}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{\text{D2}}$109

Figura 76. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 336 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{\text{D1}}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{\text{D1}}+{}^6\text{Li}_{\text{D2}}$ (${}^7\text{Li}_{\text{D1}}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{\text{D2}}$110

Figura 77. Señal de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 316 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz]. De izquierda a derecha, primera línea es ${}^6\text{Li}_{\text{D1}}$, en el medio ${}^7\text{Li}_{\text{D1}}+{}^6\text{Li}_{\text{D2}}$ (${}^7\text{Li}_{\text{D1}}$ en mayor cantidad) y última es ${}^7\text{Li}_{\text{D2}}$111

Figura 78. Línea base de la medición de absorción para una temperatura de operación del Heat Pipe de 302 [°C]. Por debajo de la señal de absorción se aprecia la escala de frecuencia que entrega como referencia la señal de barrido obtenida con el interferómetro comercial Burleigh con FSR=2 [GHz].....112

Figura 79. Densidad de partículas por unidad de volumen en función de la transmisión para cada línea de absorción alcanzada utilizando intensidad óptica del Láser EOSI 2010 de $I_{op} = 0,015915 [\text{mW}/\text{cm}^2]$. Los datos de color rojo pertenecen a la línea de absorción ${}^7\text{Li}_{\text{D2}}$, los de color azul pertenecen a ${}^7\text{Li}_{\text{D1}}+{}^6\text{Li}_{\text{D2}}$ y los de color negro pertenecen a ${}^6\text{Li}_{\text{D1}}$113

Figura 80. Transmisión en función de la temperatura aplicada en Heat Pipe para cada línea de absorción alcanzada utilizando intensidad óptica del Láser EOSI 2010 de $I_{op} = 0,015915 [\text{mW}/\text{cm}^2]$. Los datos de color rojo pertenecen a la línea de absorción ${}^7\text{Li}_{\text{D2}}$, los de color azul pertenecen a ${}^7\text{Li}_{\text{D1}}+{}^6\text{Li}_{\text{D2}}$ y los de color negro pertenecen a ${}^6\text{Li}_{\text{D1}}$114

Índice de tablas

Capítulo 2

Tabla 1. Propiedades físicas fundamentales del litio.....12

Tabla 2. Los datos mostrados indican los valores de la presión de vapor y la densidad de partículas por cada m^3 para las temperaturas de la muestra de litio resaltadas en el cálculo de presión de vapor presentadas en la Fig.2.....15

Capítulo 4

Tabla 3. Valores de cada instrumento con los que se consiguió absorción en gas de litio neutro.....103