

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



**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE LÁSER SINTONIZABLE  
VISIBLE PARA MEDICIÓN DE CONTAMINANTES  
ATMOSFÉRICOS Y EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE SU  
USO EN APLICACIONES INDUSTRIALES**

**CRISTIAN PATRICIO MORENO PÉREZ**

Profesor Guía: Dr. Ignacio Enrique Olivares Bahamondes

Trabajo de titulación presentado en la Facultad de Ciencia,  
en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para  
optar al Título Profesional de Ingeniero Físico

Santiago - Chile  
2011

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE LÁSER SINTONIZABLE VISIBLE  
PARA MEDICIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y EVALUACIÓN  
DE LA FACTIBILIDAD DE SU USO EN APLICACIONES INDUSTRIALES**

Por

**CRISTIAN PATRICIO MORENO PÉREZ**

Éste trabajo de titulación fue preparado bajo la supervisión del profesor guía Dr. 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. Ernesto Gramsch Labra .....

Dr. Ricardo Pesse Löhr .....

Dr. Patricio Pérez Jara .....

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

.....  
Roberto Bernal Valenzuela  
Jefe de Carrera

## AGRADECIMIENTOS

En estas líneas deseo expresar un total agradecimiento a mi familia completa, mis padres, hermanos y sobrinos, quienes son el pilar fundamental de mi vida, entregándome la fuerza necesaria para salir adelante, ya que con su apoyo hoy puedo estar presentando este trabajo.

En forma especial agradezco a mi hermana Alicia, su esposo Osvaldo y mi sobrina Bárbara por hacerme sentir un miembro más en su familia y acogerme durante estos años de estudio y estadía en Santiago.

Agradezco a mi profesor guía Dr. Ignacio Olivares por permitirme trabajar en el laboratorio de óptica para realizar este trabajo, por su apoyo y guía constante.

El logro de los resultados no hubiese sido posible sin la ayuda de los compañeros del laboratorio, además de los mecánicos de precisión del laboratorio de máquinas que siempre estuvieron dispuestos a colaborar con el trabajo de la construcción de las piezas que muy bien saben hacer, a quienes se agradece.

No puedo dejar de agradecer a mis amigos Katherine y Jorge, con quienes pude discutir tantos temas y recibir otro punto de vista respecto del trabajo realizado, además de aprender mucho de ellos.

## DEDICATORIA

*A mis padres*  
*Ulises y Adriana*

# Tabla de Contenido

## Capítulo 1: Introducción

Introducción.....	2
-------------------	---

## Capítulo 2: Teoría

2.1 Diodo láser.....	4
2.2 Estructura microscópica del diodo láser.....	6
2.3 Cavidad extendida del diodo láser.....	8
2.4 Configuración Littrow.....	10
2.5 Configuración Littman-Metcalf.....	13
2.6 Interferómetro Fabry-Perot.....	15
2.7 Interferómetro Fabry-Perot confocal.....	19
2.8 Propiedades del litio.....	20
2.9 Forma de una línea de absorción.....	21

## Capítulo 3: Experimento

3.1. Construcción de soportes del láser.....	23
3.2 Construcción de soportes para óptica del láser.....	26
3.3 Construcción de sistema de sellado del láser.....	29
3.4 Determinación de ángulo de incidencia para configuración Littrow.....	30
3.5 Circuito de protección de corriente del diodo láser.....	32
3.6 Colimación del haz.....	33
3.7 Alineación del haz.....	33
3.8 Controladores de corriente y temperatura.....	34
3.9 Construcción de montura para espejo y piezoeléctrico del interferómetro Fabry-Perot confocal.....	35
3.10 Construcción de montura para espejo y cilindro con hilo interior.....	37

3.11 Diseño y construcción de placa base del interferómetro.....	38
3.12 Diseño y construcción de caja para el interferómetro.....	39
3.13 Conexión del piezoeléctrico del interferómetro y consideraciones útiles.....	41
3.14 Experimento para medición de la longitud de onda del láser con espectrómetro de rejilla.....	43
3.15 Método de medición de los modos del láser usando interferómetro Fabry-Perot confocal.....	43
3.16 Método de medición del rango de barrido del láser .....	45
3.17 Modificaciones al sistema original.....	47
3.18 Método de calibración del láser usando celda de calibración.....	48
3.19 Características de diodos láser disponibles para 670 [nm].....	50
3.20 Características de piezoeléctricos usados.....	50

#### Capítulo 4: Resultados

4.1 Medición de la longitud de onda con espectrómetro de rejilla.....	52
4.2 Medición de modos longitudinales del láser usando interferómetro Fabry-Perot confocal construido.....	55
4.3 Medición de modos longitudinales del láser usando interferómetro Fabry-Perot confocal Toptica.....	58
4.4 Medición del rango de barrido del láser usando diferentes piezoeléctricos.....	60
4.5 Calibración del láser usando celda de calibración.....	63

#### Capítulo 5: Análisis de resultados

5.1 Medición de la longitud de onda con rejilla de difracción.....	69
5.2 Medición de modos longitudinales del láser usando interferómetro Fabry-Perot confocal construido.....	69
5.3 Medición de modos longitudinales del láser usando interferómetro Fabry-Perot confocal Toptica.....	70

5.4 Medición del rango de barrido del láser usando diferentes piezoeléctricos.....	70
5.5 Calibración del láser usando celda de calibración.....	71
Capítulo 6: : Factibilidad de uso de láser de diodo sintonizable en aplicaciones industriales	
Factibilidad de uso de láser de diodo sintonizable en aplicaciones industriales.....	72
Capítulo 7: Discusión	
Discusión.....	76
Capítulo 8: Conclusión	
Conclusión.....	88
Capítulo 9: Referencias	
Referencias. ....	89

# Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un prototipo de láser sintonizable, usando configuración Littrow, en la región del espectro visible para su posterior aplicación en la medición de contaminantes industriales atmosféricos. El trabajo incluye la caracterización del láser con un espectrómetro de baja resolución, la construcción de un interferómetro Fabry-Perot confocal de barrido de alta resolución que permite estudiar los modos del láser, la calibración del láser con celdas de calibración. Se evaluará la factibilidad de usar este láser en aplicaciones relacionadas con medición de contaminantes producidos por la industria y sus costos de fabricación asociados.



# Capítulo 1

## Introducción

El uso de diodos láser ha aumentado recientemente debido a su bajo costo, amplia gama de longitudes de onda disponibles ya que es posible reducir su ancho de banda usando cavidades externas que permiten adicionalmente variar continuamente la longitud de onda del láser. Bajo ciertas condiciones este barrido se efectúa sin saltos de modos. Estas características convierten al láser de cavidad extendida en una excelente herramienta para el trabajo en espectroscopía, metrología y física atómica [1,2] reemplazando a los láseres de colorante.

En este trabajo se desarrolla un prototipo de láser de cavidad extendida en configuración Littrow según modelo de MacAdam, Steinbach, and Wieman [3]. Se puso a prueba una celda de calibración Heat Pipe que genera vapor de litio neutro. El diodo láser fue sintonizado cerca de la frecuencia de resonancia del vapor de litio en torno a los 670 [nm]. Además el sistema óptico de este prototipo cuenta con un lente esférico para la colimación del haz, una red de difracción y un elemento piezoeléctrico para el barrido de la cavidad extendida que permite la sintonización del láser. Junto con el sistema de barrido mecánico de la red de difracción, la corriente aplicada y la temperatura del diodo láser son parámetros relevantes para la estabilidad y sintonización de la emisión láser.

El trabajo incluye la construcción de un interferómetro Fabry-Perot confocal de barrido [4] que permite estudiar la estabilidad, el perfil espectral y el barrido en frecuencia que del sistema láser. El interferómetro fue construido con espejos plano cóncavos de alta reflectividad. Adicionalmente se utilizó un espectrómetro de baja resolución para tener una medida del centrado de la longitud de onda a la cual emite el diodo láser para tener

la referencia de cuan cerca se encuentra respecto de la frecuencia de absorción del litio. El espectrómetro permite medir de manera gruesa el cambio continuo de frecuencias debido al giro de la red y determinar el rango máximo de variación de la longitud de onda que es del orden de 10 [nm].

Se pusieron a prueba diferentes elementos piezoeléctricos para estudiar y conseguir el mayor rango posible de barrido en frecuencia libre de saltos de modos en el caso de la cavidad Littrow o cavidad extendida. Se estudió otra forma de barrido del láser sin cavidad extendida que consiste en modular la corriente del diodo láser. Se compararon los resultados obtenidos con y sin cavidad libre. Para obtener absorción en vapor de litio se necesita disponer de un rango de barrido en frecuencia de 30 [GHz] para poder ver las tres líneas de absorción resonante del litio. En particular se midió el rango de barrido libre de modos del láser cavidad extendida y se comparó con la cavidad libre. Se midió la absorción con el láser de cavidad libre.

Se evaluó la factibilidad del uso de láseres de diodo sintonizable y las técnicas generadas para su aplicación en la industria y los costos asociados a su fabricación.

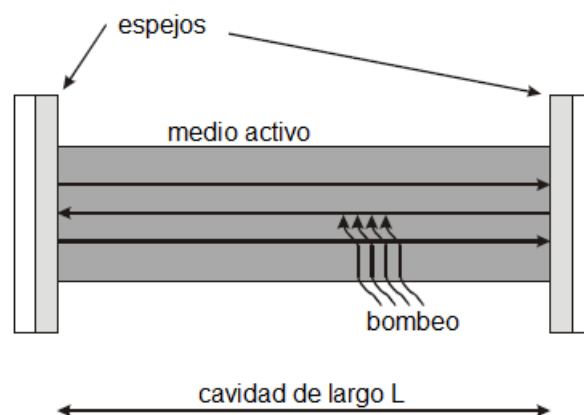
# Capítulo 2

## Teoría

### 2.1 Diodo láser

Un diodo láser es un semiconductor pequeño, eficiente, confiable y de bajo costo que entrega una luz coherente que puede ser utilizada en diferentes aplicaciones [1, 2, 5].

Las condiciones para tener un láser (LASER: por su sigla en inglés Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) son tener un medio activo (medio amplificador de luz) donde ocurre la emisión estimulada y el resonador óptico o cavidad que tiene dos espejos reflectantes, como se observa en la Fig. 2.1.

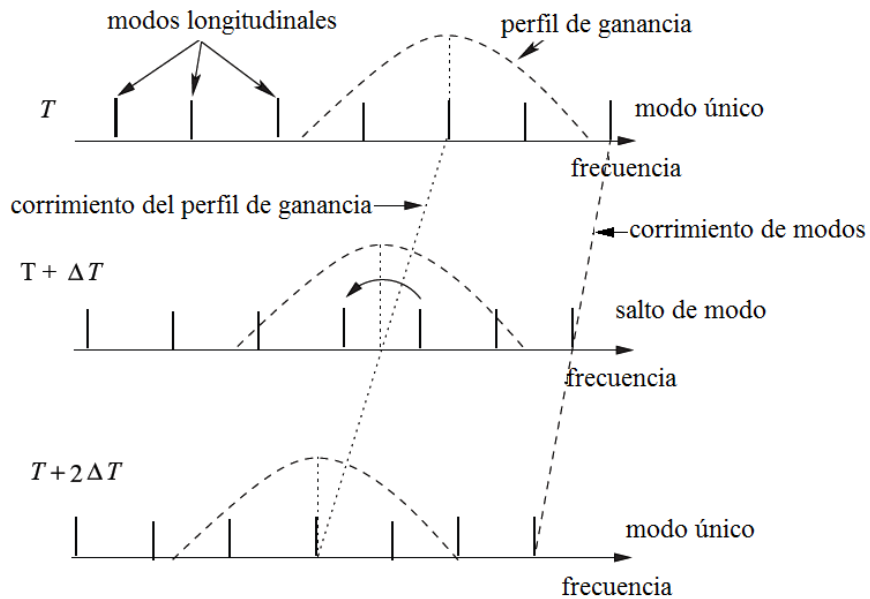


**Figura 2.1:** Elementos básicos de un láser.

El laseo o ganancia ocurre si la tasa de cambio en las poblaciones producida por la emisión estimulada supera la de absorción estimulada, por lo tanto la población del estado excitado es mayor que la del estado base. Esta condición ocurre sólo cuando el sistema no está en equilibrio y se llama inversión de población, en donde la energía necesaria para mantener esta inversión es suplida por el sistema, lo que se denomina bombeo. El bombeo se puede lograr inyectando luz de suficiente energía (bombeo óptico), o en el caso del diodo láser se hace inyectando transportadores de carga en la juntura p-n del diodo semiconductor.

La segunda condición para tener luz láser es la retroalimentación óptica, por lo tanto el medio activo debe ser ubicado en una cavidad óptica resonante, siendo un par de espejos paralelos altamente reflectantes el resonador más simple, que recibe el nombre de cavidad Fabry-Perot. Como en la cavidad hay una longitud de onda óptica particular que se ajusta, éstas ondas de luz reciben el nombre de modos de la cavidad, siendo el modo que recibe el más alto valor de amplificación del medio activo que comienza a oscilar. Dependiendo la ganancia del medio de la temperatura y la corriente, ya que a medida que la corriente aumenta sube la temperatura lo que implica un desplazamiento de los modos longitudinales. Un efecto similar ocurre al calentar el sistema por medio del Peltier. En la Fig. 2.2 se puede observar tal proceso, aunque la ganancia del medio se ha representado con un ancho menor para observar los saltos de modo, ya que en la práctica es muy ancha y por poco relevante para la sintonización del láser,

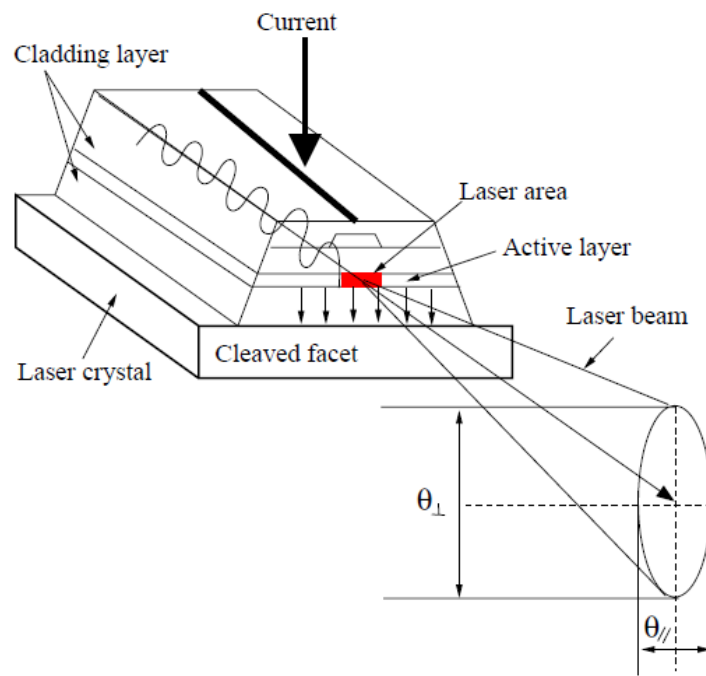
El laseo comienza cuando se supera un nivel característico del bombeo llamado umbral del láser, cuando el bombeo es bajo el laseo no ocurre, el láser está bajo el umbral y emite luz débil, incoherente y espectralmente amplia. Sobre el umbral, la emisión es intensa, coherente y espectralmente definida. El ancho de línea es una característica muy importante del láser, en particular para aplicaciones en espectroscopía.



**Figura 2.2:** Representación esquemática del perfil de ganancia y los modos longitudinales que se desplazan a medida que cambia la temperatura, adaptado de [15].

## 2.2 Estructura microscópica del diodo láser

Los diodos láser son muy pequeños y altamente eficientes láseres de estado sólido. En un semiconductor la transición óptica ocurre entre bandas de energía continuas [5]. La banda correspondiente al estado base es la banda de valencia mientras que la banda del estado excitado es la banda de conducción, la banda de valencia y conducción están separadas energéticamente por un gap o salto de banda (gap-band) , siendo ésta separación la que determina la longitud de onda de la emisión láser. El diodo láser más simple es un pequeño chip semiconductor de GaAs de alrededor de 400 [ $\mu\text{m}$ ] de largo [7], un espesor de aproximadamente 1 [ $\mu\text{m}$ ] y un ancho de alrededor de 3 [ $\mu\text{m}$ ] [5], que emite luz por la cara frontal y una pequeña cantidad por la cara de atrás, teniendo cada cara reflectividades distintas, la corriente se maneja desde arriba hacia abajo del chip (ver Fig. 2.3) creando pares electrón-hueco que se recombinan en el sustrato activo, emitiendo con ello luz. Las caras del chip en los extremos del canal actúan como espejos parcialmente reflectantes encerrando la cavidad del láser.



**Figura 2.3:** Vista esquemática de un chip de diodo láser.

La heteroestructura del diodo sirve también como guía de onda; el sustrato activo tiene un mayor índice de refracción que sus alrededores, de modo que la luz está confinada al canal por reflexión interna donde puede oscilar en distintos modos axiales simultáneamente cuando no hay un elemento selector de longitud de onda en la cavidad. En algunos casos si el ancho de la región activa es muy grande el diodo láser puede emitir modos transversales, especialmente cuando se supera ampliamente la corriente umbral.

Los niveles de potencia para láseres de modo único son típicamente de unos pocos [mW], pero pueden llegar hasta 1 [W]. La superficie trasera de la pequeña cavidad semiconductor es altamente reflectante, mientras que la superficie delantera es usualmente cubierta con una delgada capa antirreflectante para mejorar su transmisión [6]. Los diodos láser tiene un ancho de banda de alrededor de 50 [MHz] y son altamente sensitivos a la retroalimentación óptica, ya que una millonésima parte de la luz de salida

se refleje de vuelta al láser puede afectar su estabilidad en frecuencia, pero que bajo ciertas circunstancias esto puede ser usado como una ventaja [7].

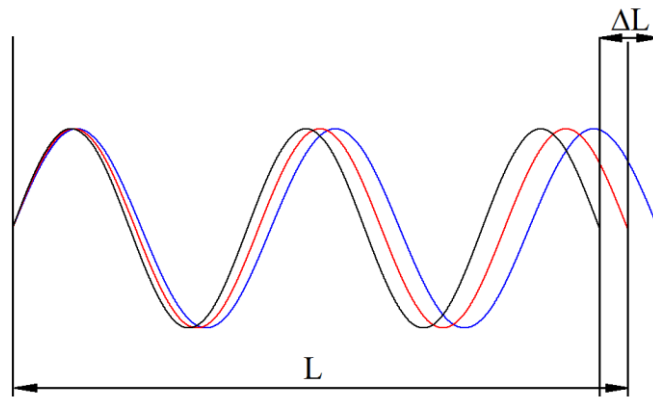
## 2.3 Cavidad extendida del diodo láser

En general, las características de un diodo láser con una cavidad extendida pueden cambiar enormemente, dependiendo de la longitud de la cavidad externa, intensidad de la retroalimentación, potencia óptica y parámetros del diodo láser [8, 9], siendo el propósito de la cavidad extendida reducir el ancho de línea hasta aproximadamente unas centenas de [Khz] [2], lo cual es suficiente para aplicaciones de espectroscopía.

Las cavidades en configuración Littrow y Littman-Metcalf son ejemplos típicos usados para formar la cavidad extendida, en donde se usa una red de difracción para proporcionar la retroalimentación óptica, seleccionando un único modo de operación y sintonizando la longitud de onda en un amplio rango moviendo y rotando la posición de la red [8]. La frecuencia central de emisión del láser depende de la longitud  $L$  de la cavidad interna, ya que sólo se amplifican las frecuencias con longitud de que cumplen la igualdad

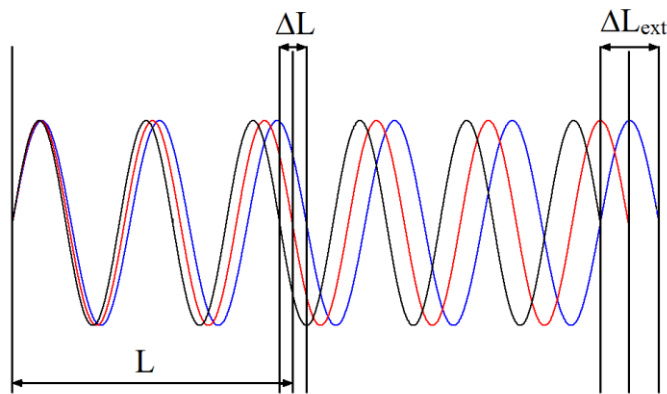
$$L = m \frac{\lambda}{2} \quad (2.1)$$

Donde  $m$  es un entero. Como se dijo el diodo láser tiene una cavidad de aproximadamente  $400 \mu\text{m}$ , por lo que pequeñas variaciones mecánicas o de temperatura afectan el largo de la cavidad, causando que frecuencias cercanas entre sí sean amplificadas como se muestra en la Fig. 2.4



**Figura 2.4:** Cavity interna de un láser modificada  $\Delta L$ , debido a pequeñas variaciones mecánicas o de temperatura. Cada línea representa frecuencias cercanas entre sí.

Al usar una superficie reflectora a la salida del láser, de forma que una parte del haz regrese al interior de la cavidad se puede amplificar un número mucho menor de frecuencias emitidas, ya que las onda se desplaza en una cavidad más larga permitiendo una mayor separación de las frecuencias, con lo que menos frecuencias cumplen con la Ec. 2.1 (ver Fig. 2.5).

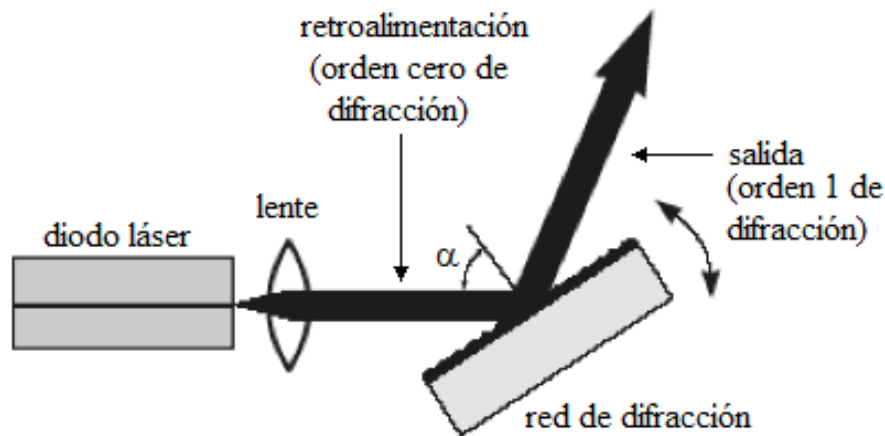


**Figura 2.5:** Cavity extendida, se observa que la separación entre las ondas con frecuencias distintas aumenta al alejarse de la cavidad  $\Delta L < \Delta L_{ext}$ .



## 2.4 Configuración Littrow

La configuración Littrow se muestra en la Fig. 2.6, en donde los componentes principales son el diodo láser, el lente y la red de difracción. A la salida del diodo láser se coloca el lente esférico para lograr la colimación del haz, luego se coloca la red de difracción a una pequeña distancia, en donde incide la luz del diodo láser siendo refractada en distintos órdenes. El primer orden se refleja hacia el diodo láser como retroalimentación óptica externa y el orden cero es la salida del láser de cavidad extendida (Fig. 2.6). Las principales ventajas de esta configuración son su simplicidad, pequeña longitud de la cavidad externa, tiene menos elementos ópticos que las demás configuraciones, haciendo más fácil el alineamiento y tiene una alta potencia de salida debido a la poca pérdida en la cavidad.



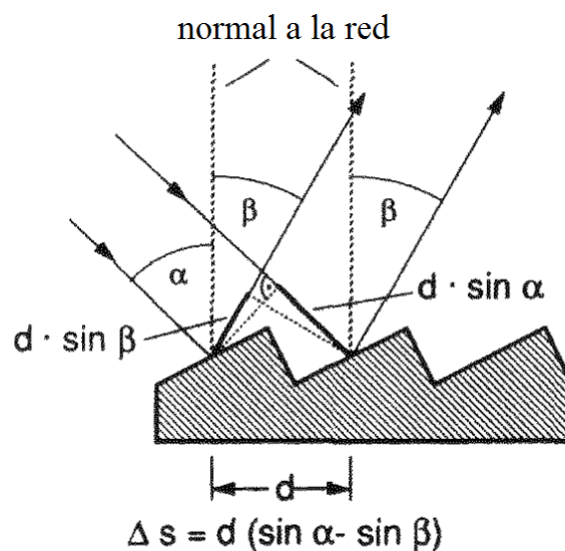
**Figura 2.6:** Esquema de diodo láser en configuración Littrow.

La red de difracción al estar cubierta por un patrón regular de surcos paralelos, cuya distancia entre sí es comparable con la longitud de onda de la luz incidente, en donde cada surco reemite la luz incidente, siendo la luz total reflejada una superposición coherente de ondas reflejadas por cada surco, observándose regiones de interferencia constructiva destructiva. El origen de la interferencia constructiva se muestra en la Fig. 2.7, en donde se observan dos rayos paralelos incidiendo en dos surcos adyacentes con un ángulo  $\alpha$  respecto a la normal de la red. La interferencia constructiva ocurre en los

ángulos de reflexión  $\beta$  para los cuales la diferencia de camino óptico  $\Delta s = d(\sin \alpha - \sin \beta)$  es un múltiplo entero  $m$  de la longitud de onda  $\lambda$  (ver Ec. 2.2), a estos ángulos se les conoce como órdenes de difracción y son diferentes para cada frecuencia.

$$d(\sin \alpha \pm \sin \beta) = m\lambda \quad (2.2)$$

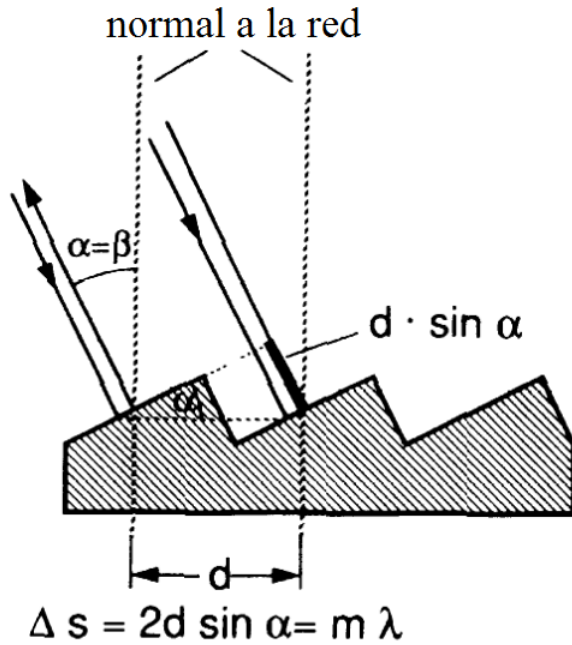
Cuando los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  se encuentran del mismo lado de la normal de la red se usa el signo positivo, en caso contrario se usa el negativo. El orden de difracción cero  $m=0$  corresponde al ángulo de reflexión especular  $r$  dado por la óptica geométrica.



**Figura 2.7:** Red de difracción, condición de interferencia constructiva.

En el caso particular que el ángulo de incidencia y el ángulo correspondiente al orden  $m=1$  coinciden se tiene la configuración Littrow (ver Fig. 2.8), con lo cual la Ec. 2.2 para interferencia constructiva se reduce a

$$2d \sin \alpha = m\lambda \quad (2.3)$$



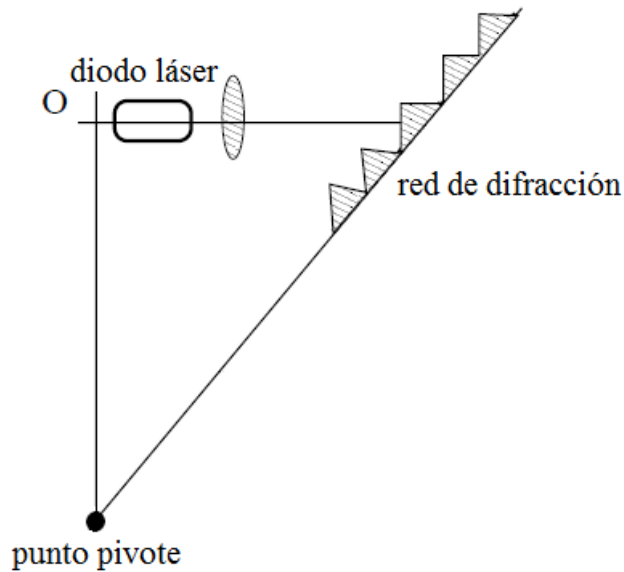
**Figura 2.8:** Red de difracción, condición para configuración Littrow.

Usando la configuración Littrow a la salida de un diodo láser se obtiene una longitud de onda  $\lambda_0$  que satisface la Ec. 3 y se refleja hacia el diodo láser, en donde se estimula la emisión de fotones con la misma longitud de onda, provocando que el láser centre su emisión en  $\lambda_0$  y con ello también disminuya el ancho de banda de la emisión. Al variar el ángulo  $\alpha$  o la longitud de la cavidad se logra cambiar la longitud  $\lambda_0$  que satisface la Ec. 2.3, con lo que se puede sintonizar el láser.

En la cavidad Littrow es posible tener un rango más amplio libre de modos hop al rotar y trasladar sincrónicamente la red, ya que la red es desplazada por un piezoeléctrico al cual se le aplica un voltaje triangular, para asegurar que la curva de retroalimentación se desplace a la misma razón que los modos longitudinales. Esto se logra cambiando el ángulo de la red y la longitud  $L$  de la cavidad sincrónicamente, debiendo satisfacer la siguiente ecuación

$$\frac{d\lambda_{\text{retroalimentac.}}}{d\alpha} \Delta\alpha = \frac{d\lambda_{\text{modos}}}{dL} \Delta L = \frac{d\lambda_{\text{modos}}}{dL} \frac{dL}{d\alpha} \Delta\alpha \quad (2.4)$$

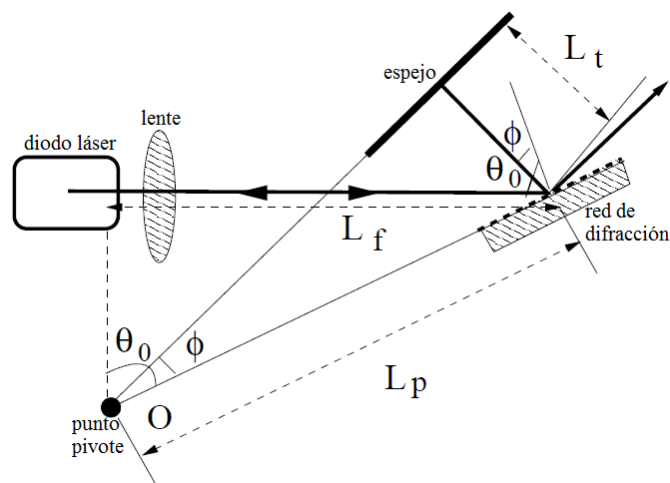
Lo cual es documentado por McNicholl and Metcalf [10], en donde la sintonización sincrónica es posible cuando el punto pivote está en la intersección del plano de la superficie de la red con el plano que corresponde a la cara posterior del diodo láser.



**Figura 2.9:** Configuración Littrow y punto pivote.

## 2.5 Configuración Littman-Metcalf

La geometría de la configuración Littman-Metcalf se muestra en la Fig. 2.10. En esta geometría se agrega un espejo, el primer orden de difracción llega al espejo y es reflejado de vuelta a la red en donde nuevamente es difractado por la red y otra vez es primer orden es enviado hacia el diodo láser como retroalimentación óptica. La salida del láser corresponde al orden cero de difracción del diodo láser, mientras que el orden cero de difracción que viene desde el espejo se pierde.

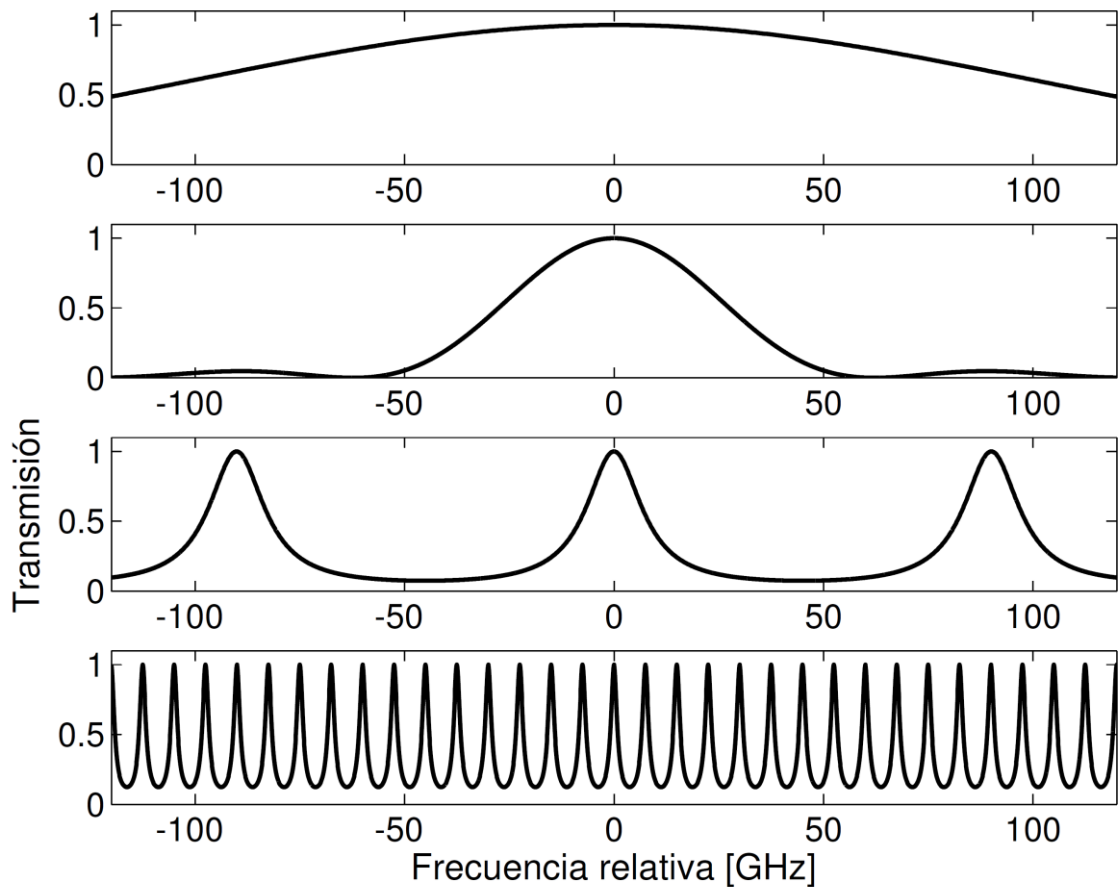


**Figura 2.10:** Configuración Littman-Metcalf y punto pivote.

Esta configuración tiene más pérdidas que la cavidad de Littrow, debido a que la luz pasa dos veces por la red de difracción y el orden cero de difracción de la luz que retorna del espejo se pierde, por lo tanto la potencia de salida es más baja en este caso.

La principal ventaja de esta cavidad, comparada con la de Littrow, es que la dirección del haz permanece constante cuando se rota el espejo. La cavidad Littman-Metcalf aumenta el rango de longitudes de onda libre de saltos de modos, esto se logra cuando el desplazamiento en la curva de ganancia por retroalimentación se sintoniza sincrónicamente con los modos de la cavidad. El desplazamiento de la curva de ganancia corresponde a la rotación del espejo y el cambio en los modos de la cavidad es el resultado del movimiento traslacional del espejo. Las dos razones son iguales cuando el plano de la cara posterior del diodo láser, el plano de la superficie de la red y el plano del espejo se intersectan en un punto pivote que actúa como eje rotacional, como se muestra en la Fig. 2.10.

Después de estudiar el comportamiento de los modos tanto en la cavidad interna, la ganancia del medio, la retroalimentación óptica y la cavidad externa podemos observar qué pasa con estos cuatro elementos en la Fig. 2.11.



**Figura 2.11:** Contribución de los diferentes elementos a la sintonización del láser, de arriba hacia abajo, ganancia del medio, retroalimentación de la red de difracción, cavidad interna y cavidad externa.

## 2.6 Interferómetro Fabry-Perot

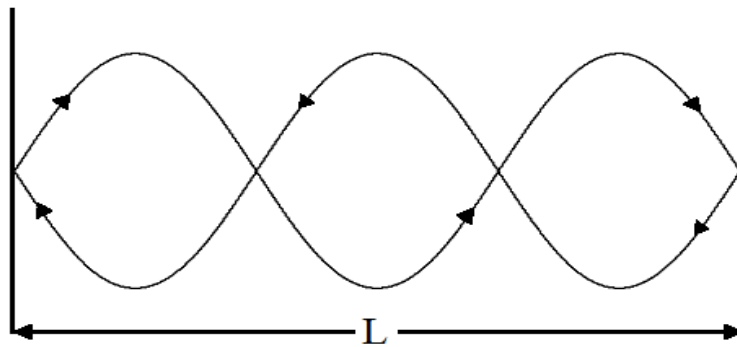
En el desarrollo del trabajo se construye un interferómetro Fabry-Perot, por lo que estudiaremos ahora las características y configuración usada.

El interferómetro Fabry-Perot, también conocido como interferómetro de haces múltiples es muy importante en la óptica moderna. Su principal valor surge del hecho que a parte de ser un dispositivo espectroscópico de alto poder resolutivo, también sirve como cavidad resonante para el láser, filtro óptico sintonizable y es ideal para medir anchos de línea de láseres, estructura de modos longitudinales y estabilidad en frecuencia de la fuente láser [11].

La configuración más simple son dos espejos planos, paralelos, altamente reflectantes y separados por una distancia  $L$ , donde los espejos son de vidrio semiplatado o aluminizado, éstos espejos deben estar perfectamente alineados, es decir paralelos uno respecto del otro para no perder luz. La luz incidente entra a la cavidad Fabry-Perot y se somete a múltiples reflexiones entre los espejos, de forma tal que la luz puede interferir con sí misma muchas veces (ver Fig. 2.13). Si la frecuencia de la luz incidente es tal que ocurre interferencia constructiva en la cavidad, la luz será transmitida. La condición para interferencia constructiva es que la luz forme ondas estacionarias entre los dos espejos (ver Fig. 2.12), es decir, la distancia óptica entre los dos espejos debe ser igual a un número entero de media longitud de onda de la luz incidente, definido por

$$nL \cos \alpha = m \frac{\lambda}{2} \quad (2.5)$$

Donde  $n$  es el índice de refracción del medio,  $L$  la separación entre espejos,  $\alpha$  es el ángulo de inclinación de la dirección de entrada de la luz respecto a la normal de los espejos y  $m$  corresponde al orden de interferencia (número entero).

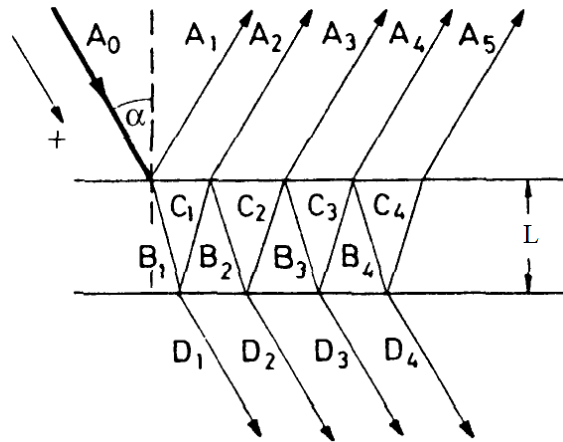


**Figura 2.12:** Onda estacionaria dentro de una cavidad Fabry-Perot de largo  $L$ .

Debido a que el medio entre los espejos es aire, la inclinación del ángulo de entrada de la luz respecto de la normal es  $0^\circ$  si está correctamente alineado, entonces  $\cos \alpha = 1$ , la Ec. 2.5 se reduce a:

$$L = m \frac{\lambda}{2} \quad (2.6)$$

La Ec. 2.6 muestra que la longitud de onda transmitida por un interferómetro Fabry-Perot depende de la separación física entre los espejos que lo forman.



**Figura 2.13:** Interferencia de haces múltiples para dos superficies parcialmente reflectantes, separadas por una distancia  $L$ .

De la Fig. 2.13, para incidencia vertical ( $\alpha = 0$ ), en una placa plana infinitamente extendida, se tiene un número infinito de reflexiones. La amplitud total de la onda reflejada es [12]

$$A = -\sqrt{R}A_0 \frac{1 - e^{i\phi}}{1 - Re^{i\phi}} \quad (2.7)$$

Donde  $A_0$  es la amplitud,  $R$  es la reflectividad,  $\phi$  es la fase.

La intensidad  $I = 2c\epsilon_0 AA^*$  de la onda reflejada es

$$I_R = I_0 R \frac{4 \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (2.8)$$

de manera análoga, se encuentra la intensidad total de la onda transmitida

$$I_T = I_0 \frac{(1 - R)^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (2.9)$$



La Ecs. 2.8 y 2.9, son llamadas “Formulas de Airy” [12]. Como se ha despreciado la absorción, se debiera tener que  $I_R + I_T = I_0$ , lo que podemos fácilmente verificar de las ecuaciones anteriores. Considerando  $F = 4R/(1-R)^2$  podemos re-escribir las formulas de Airy de la forma,

$$I_R = I_0 \frac{F \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}{1 + F \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (2.10)$$

$$I_T = I_0 \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (2.11)$$

El rango de frecuencias  $\delta\nu$  entre dos máximos se denomina rango espectral libre (FSR) del interferómetro.

$$FSR = \frac{c}{2nL} \quad (2.12)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $n$  el índice de refracción, con  $n = 1$  resulta

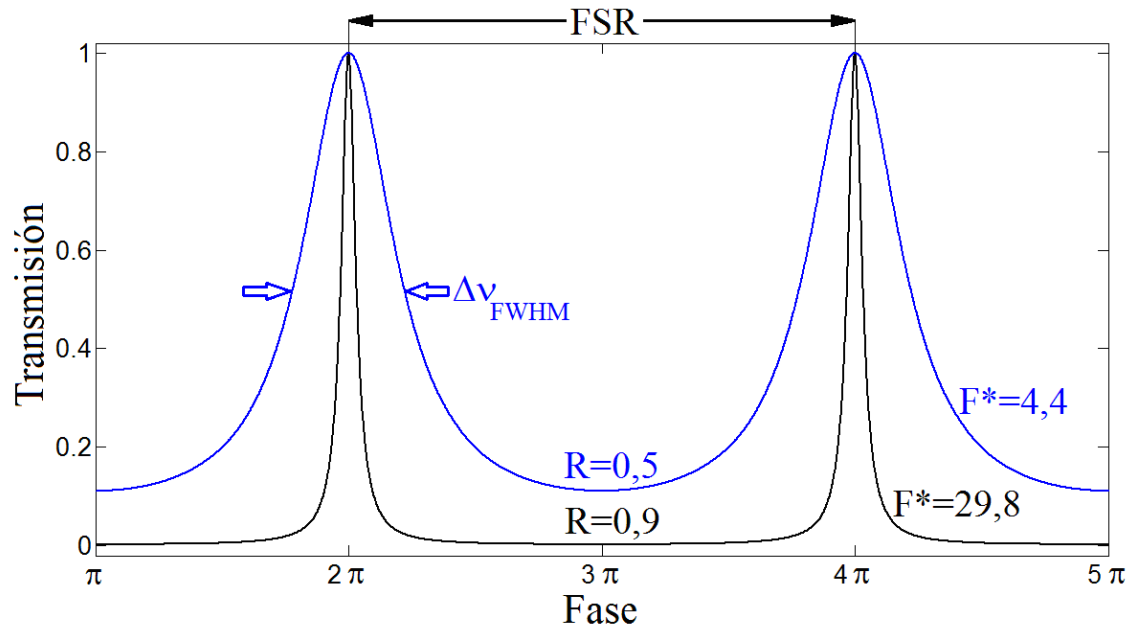
$$FSR = \frac{c}{2L} \quad (2.13)$$

En unidades de frecuencia, la anchura máxima del peak a la altura media, con  $n = 1$  es [12]

$$\Delta\nu_{FWHM} = \frac{c}{2L} \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}} \quad (2.14)$$

La razón  $FSR/\Delta\nu_{FWHM}$  se llama finesa  $F^*$  del interferómetro. De las Ecs. 2.13 y 2.14 se obtiene

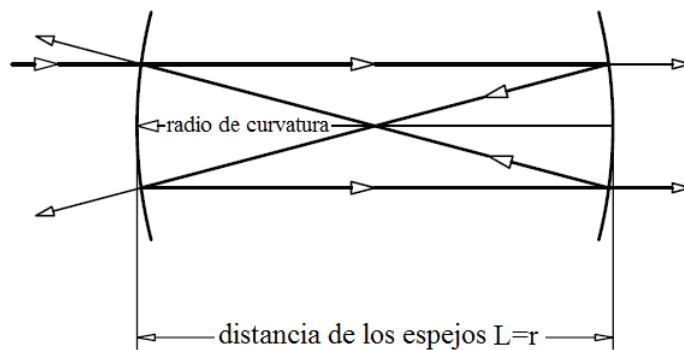
$$F^* = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} = \frac{\pi}{2} \sqrt{F} \quad (2.15)$$



**Figura 2.14:** Función de Airy para reflectividades de 0,5 y 0,9, en donde se observa cómo cambia  $\Delta\nu_{FWHM}$  y con ello la finesa.

## 2.7 Interferómetro Fabry-Perot confocal

Este tipo de interferómetro es un tipo especial de sistema que usa dos espejos cóncavos en donde la separación  $L$  entre ambos corresponde al radio  $r$  de curvatura (ver Fig. 2.15), resultado un foco común.



**Figura 2.15:** Interferómetro Fabry-Perot confocal.

Este tipo de sistema es más fácil de alinear y se puede alcanzar una alta finesa. La limitación de un interferómetro confocal es que el FSR es fijo, mientras no se reemplacen los espejos por otros con diferente radio de curvatura.

Para el interferómetro confocal la condición de interferencia constructiva es diferente, ya que de la Fig. 2.15 observamos que el rayo recorre cuatro veces la cavidad para llegar al punto de entrada y no dos veces como en la cavidad de espejos paralelos, es por ello que en este caso el rango espectral libre es

$$FSR = \frac{c}{4L} \quad (2.16)$$

Lo cual indica que el espectro de transmisión se reproduce cada un cuarto de onda  $(\lambda/4)$  de cambio en la separación de los espejos [13].

La separación de los espejos y por ende de la cavidad se hace con el uso de un transductor piezoeléctrico.

## 2.8 Propiedades del litio

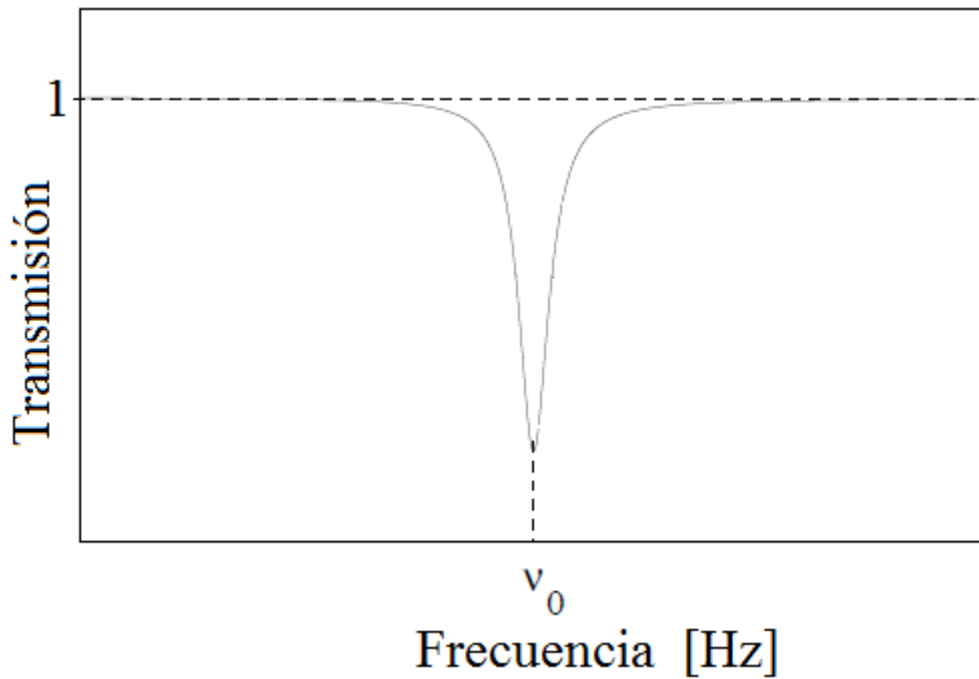
El litio es el más ligero de los metales, se oxida rápidamente en aire o agua como todos los alcalinos. El litio aparece naturalmente en dos isótopos,  ${}^7\text{Li}$  con cuatro neutrones y  ${}^6\text{Li}$  con tres. Las propiedades físicas fundamentales del litio se aprecian en la tabla 2.1.

Propiedades	Símbolo	Valor
Densidad (300 K)	$\rho$	0,534 g · cm <sup>-3</sup>
Punto de fusión	$T_M$	453,69 K
Calor de fusión	$Q_F$	2,99 kJ · mol <sup>-1</sup>
Punto de Ebullición	$T_B$	1615 K
Calor de vaporización	$Q_V$	134,7 kJ · mol <sup>-1</sup>

**Tabla 2.1.** Propiedades físicas fundamentales del litio

## 2.9 Forma de una línea de absorción

Si se hace pasar luz proveniente de una fuente que emite un espectro continuo a través de una celda de calibración que contiene un gas monoatómico la luz transmitida a través de la celda puede mostrar una distribución en frecuencias como la que se muestra en la Fig. 2.16, en caso de ocurrir tal efecto, estamos en presencia de una línea de absorción del gas con centro de línea en  $\nu_0$ .



**Figura 2.16:** Diagrama de una línea de absorción.

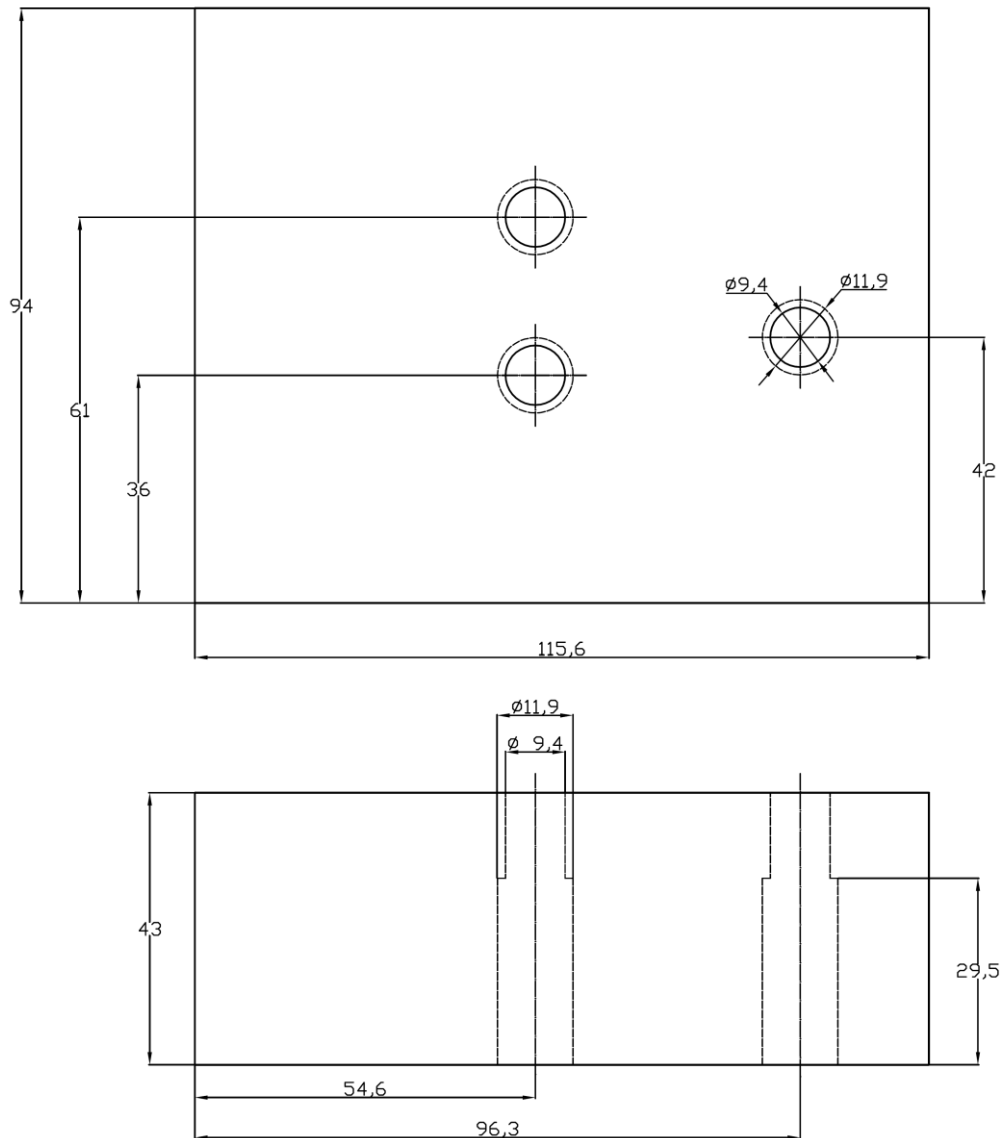
# Capítulo 3

## Experimento

En esta sección se describen los experimentos realizados y cada uno de los elementos construidos que se utilizaron en el desarrollo de la tesis, comenzando por la construcción del láser de cavidad extendida según modelo [3], con sus debidas modificaciones, procedimiento de instalación y alineación de los dispositivos ópticos y luego la construcción del interferómetro Fabry-Perot confocal [4]. Para la construcción del láser los elementos necesarios son: la fuente de luz láser, que en este caso es un diodo láser, el lente de colimación del haz de salida del diodo láser, la red de difracción que forma la cavidad extendida y se ocupa de la retroalimentación óptica hacia el diodo láser y el piezoeléctrico que permite el escaneo de la cavidad por medio del desplazamiento de la red y con ello la sintonización del láser, describiendo la construcción de las piezas que soportan estos elementos y proporcionan el aislamiento térmico debido. La construcción de un interferómetro Fabry-Perot confocal de barrido tiene como objetivo el análisis del espectro óptico del láser fabricado, por lo cual los espejos, disponibles en el laboratorio, tienen un recubrimiento optimizado para una longitud de onda de 671 [nm], ambos espejos se ubican en monturas distintas, pero se diseñan de la misma pieza para mantener alineación de ambos elementos, que son construidos en duraluminio debido a su bajo coeficiente de expansión térmica, detallando la construcción de cada elemento del interferómetro y conexiones [4]. Luego de la construcción del láser de cavidad extendida y el interferómetro Fabry-Perot se detallan los montajes y procedimientos de los experimentos necesarios para evaluar el comportamiento de los elementos ya mencionados y las modificaciones que se realizan para mejorar los resultados obtenidos.

### 3.1. Construcción de soportes del láser

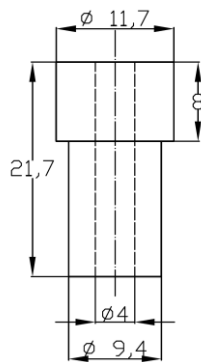
El sistema completo está soportado por una placa de duraluminio de dimensiones 115,6 x 94 x 43 [mm], que se muestra en la Fig. 3.1.



**Figura 3.1:** Placa base del láser, construida de duraluminio y que actúa como sumidero para el aislamiento térmico del sistema, que es controlado por un Peltier, medidas en [mm].

El tamaño de la placa base del láser es suficiente para aislar el sistema térmicamente y que se usa como sumidero, ya que sobre esta placa base se coloca un Peltier (Melcor, modelo CP1.4-127-045L-1-W6) y luego una placa más pequeña (de dimensiones 89,7 x 58,8 x 12,7 [mm]) en donde se ubican todos los componentes ópticos. Ambas placas se rectifican de manera de que sus caras sean planas y que el Peltier tenga un buen contacto térmico, agregando además entre ambas caras del Peltier y las placas pasta conductora térmica.

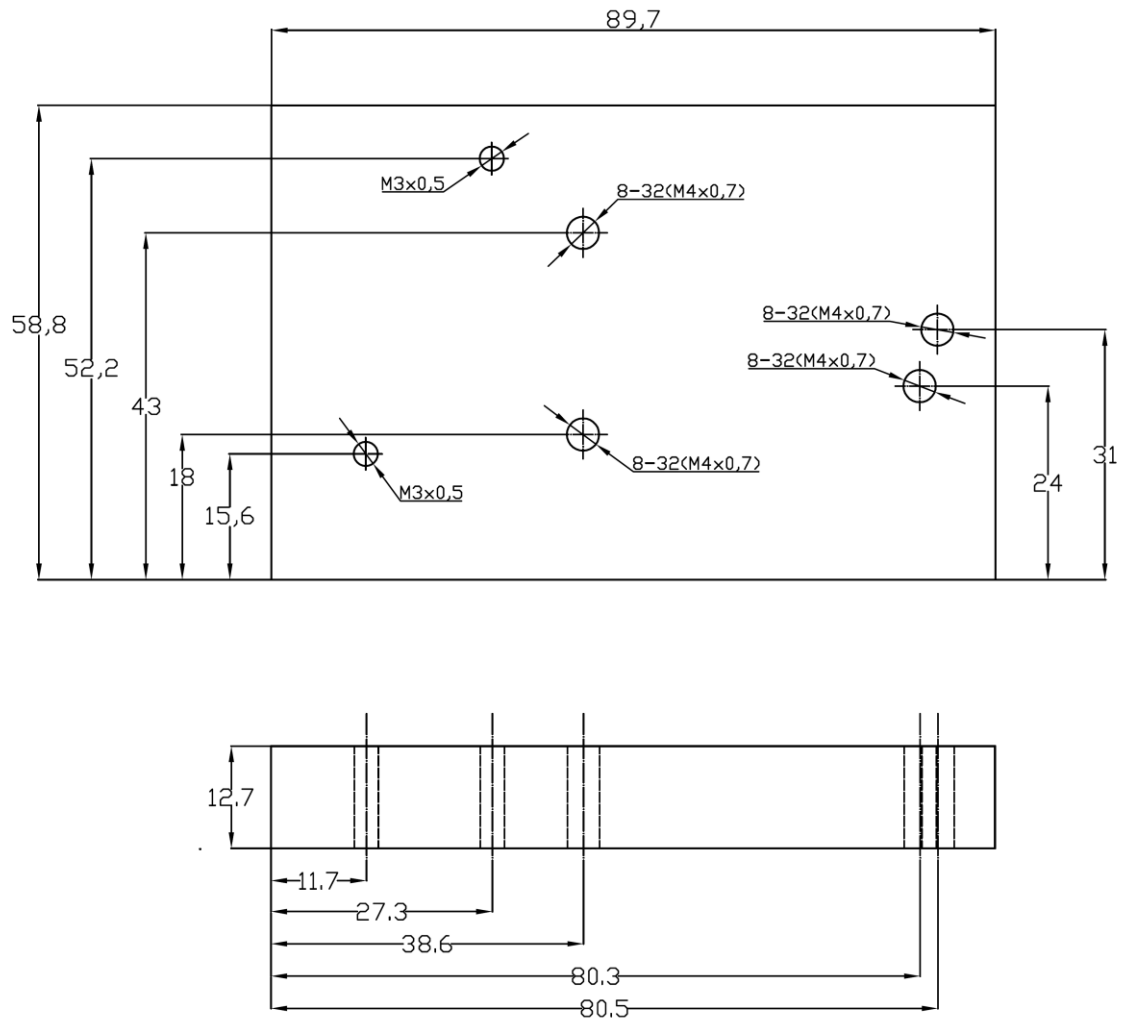
En la Fig. 3.1 se observan tres agujeros que atraviesan la pieza, y por donde pasan tres tornillos de dimensiones 8-32 x 11/2, que se atornillan en la parte inferior de la placa que soporta los elementos ópticos con sus monturas y diodo láser con lente esférico dentro del tubo de colimación, pero como se necesita que sólo el Peltier entre en contacto con ambas placas, para mantener el aislamiento térmico se coloca en cada agujero un cilindro de PVC por donde pasa el tornillo y que une ambas placas.



**Figura 3.2:** Cilindro de PVC que permite aislamiento térmico entre placa base del láser y placa superior que soporta la óptica al juntarlas con el tornillo.

La placa superior cuenta, primero con los tres agujeros con hilo para los tornillos 8-32 que la unen con la placa base (ver Fig. 3.1), permitiendo que la placa superior esté sujeta de manera segura y que además se pueda controlar se temperatura con el Peltier, ya que está aislada térmicamente debido a los cilindros de PVC que se colocaron en cada tornillo. Luego se observan los dos agujeros que soportan la base en donde se coloca el tubo de colimación con el diodo láser y el lente esférico en su interior, los tornillos

tienen hilo M3 x 0,5 y el otro agujero tiene hilo 8-32 (M4 x 0,7), que corresponde al agujero en donde se coloca una L de aluminio que tiene una canaleta que permite variar la distancia de la cavidad externa.



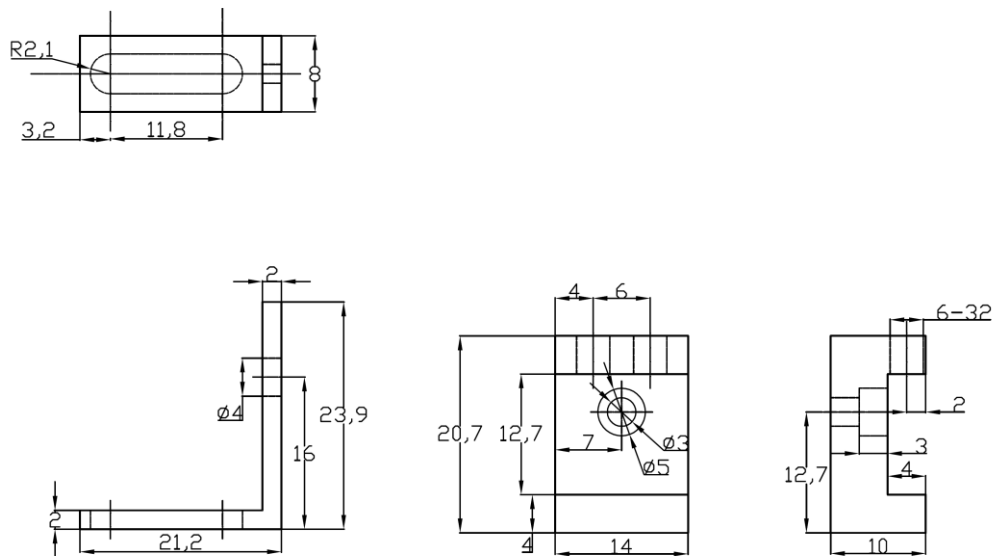
**Figura 3.3:** Placa superior, con tres agujeros con hilo 8-32 (M4 x 0,7) para unir y fijar a placa base, evitando contacto térmico a través de cilindros de PVC en cada tornillo, dos agujeros con hilo M3 x 0,5 para montura que sostiene tubo de colimación y un agujero con hilo 8-32 (M4 x 0,7) para colocar L de aluminio que soporta montura con red de difracción.



### 3.2 Construcción de soportes para óptica del láser

Después de tener el soporte completo para los elementos ópticos se diseñan las piezas que soportan tanto la red de difracción como el diodo láser con el lente esférico.

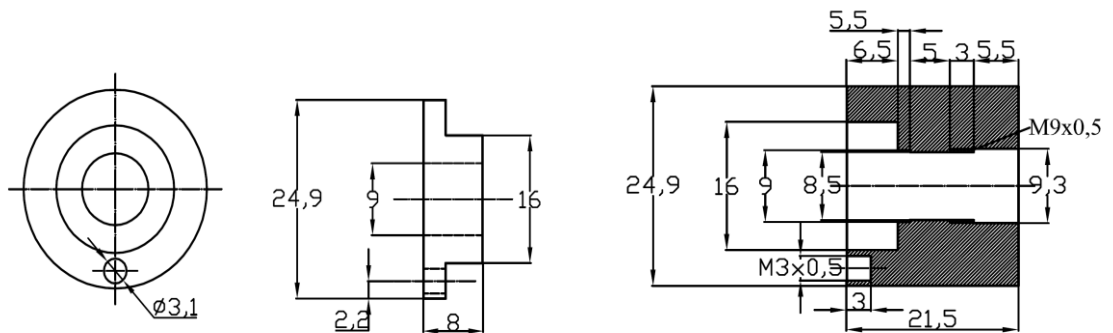
En la placa superior se atornillan tanto la montura de la red de difracción y la montura que sostiene el tubo de colimación. Debido a que la montura para la red de difracción no permite un desplazamiento lineal se fabrica una “L” de aluminio que la sostenga y también permite el desplazamiento lineal para el cambio de longitud en la cavidad externa. Las dimensiones de la red de difracción son de 12,7 x 12,7 x 6 [mm] y se diseña también un soporte que la sostenga, para que en caso de necesitar cambiar la red ésta se pueda sacar con facilidad, por lo que se usan prisioneros con hilo 6-32 y punta de goma, ver Fig. 3.4.



**Figura 3.4:** Sistema que desplaza la red, variando la cavidad externa y soporte para la red. Se observa “L” de aluminio y el soporte para la red, medidas en [mm].

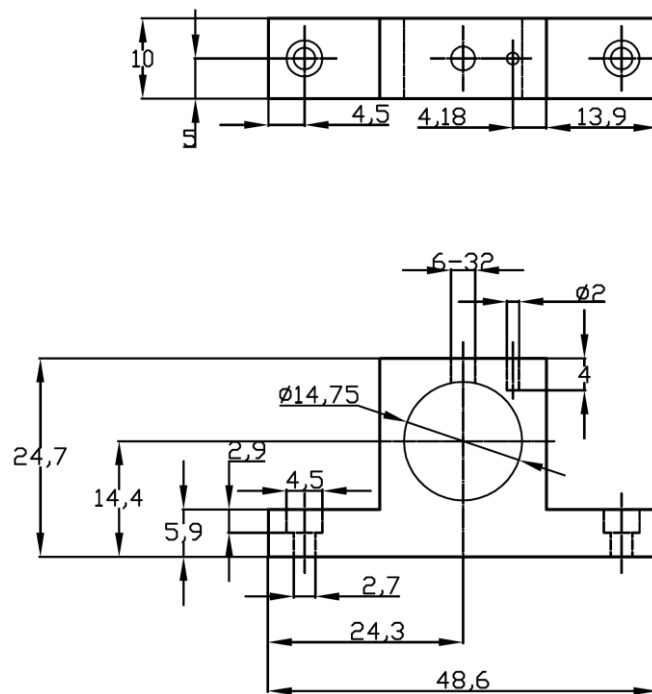
La canaleta de la “L” de aluminio se sujeta con un tornillo 8-32 (M4 x 0,7) y tiene además un agujero para que pase un tornillo 8-32 (M4), que se sujeta en la montura KMS que tiene este tipo de hilo en la parte posterior a la altura de 16 [mm], el soporte para la red se atornilla por el frente, en donde la montura KMS tiene un agujero con hilo





**Figura 3.6:** Se muestran elementos para soporte del diodo láser y lente esférico, a la izquierda la tapa de aluminio que centra el diodo láser y socket, a la derecha el cilindro en donde se coloca el diodo láser y el lente esférico, el hilo permite girar el lente hasta colimar el haz de salida del láser.

Al momento de comprar el tubo de colimación (Thorlabs, modelo LT 230P-B), el cual sirve para diodos láser de 5,6 y 9 [mm] de diámetro, aumentando las posibilidades de uso de diodos láser, se diseña otra montura que mantiene la distancia de separación entre agujeros que permiten sujetarla a la placa, pero con el diámetro del tubo.

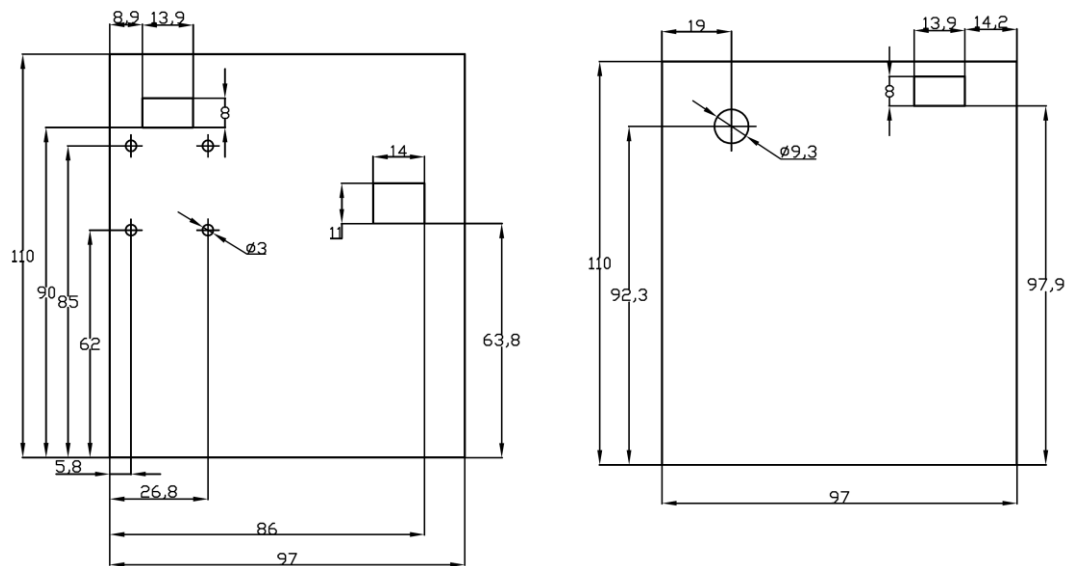


**Figura 3.7:** Montura diseñada para soportar tubo de colimación LT230P-B

En la Fig. 3.7 se observa la montura diseñada para soportar el tubo de colimación LT230P-B, el cual incluye anillos de ajuste para diodos láser de 5,6 y 9 [mm].

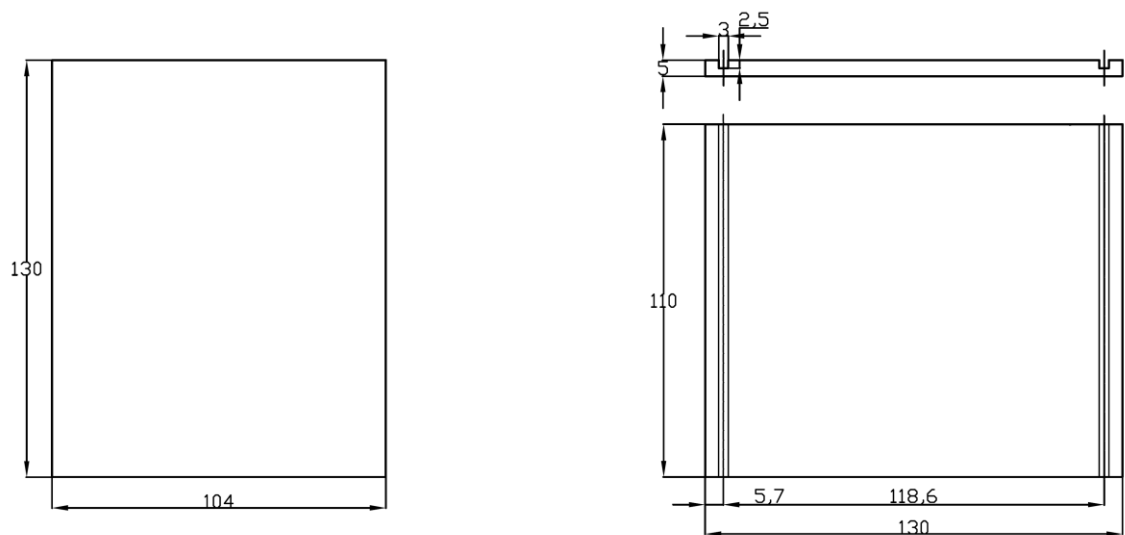
### 3.3 Construcción de sistema de sellado del láser

En la sección 3.1.1 se mostró la construcción de la placa base del láser que soporta todo el sistema y aísla térmicamente, ya que actúa como sumidero, en esta sección se muestran las paredes y tapa que se diseñaron para aislar totalmente el sistema, ya sea debido a fuentes de calor externa, corrientes de aire o la misma temperatura del laboratorio. A la placa base del láser se le hacen dos agujeros con hilo a cada lado, de manera de acercar y sujetar las placas de aluminio que se colocan en ambos extremos, la placa frontal tiene perforación para salida del láser, sostiene el circuito de protección de corriente y conector macho de para el control de corriente, mientras que la placa posterior tiene una perforación para el BNC que alimenta el piezoeléctrico que desplaza la red de difracción y la conexión del controlador de temperatura.



**Figura 3.8:** Esquema de placas frontal y posterior del láser, en la placa frontal se observan cuatro agujeros de 3 [mm] de diámetro que sostienen el circuito de protección de corriente, más arriba el agujero para el conector del controlador de corriente y a la izquierda la perforación para salida del láser. La placa posterior tiene un agujero para el BNC que alimenta el piezoeléctrico que desplaza la red de difracción y a la derecha la perforación para el conector del controlador de temperatura.

La placa frontal cuenta además con una tapa que permite cerrar la salida del láser cuando no esté en uso con el fin de evitar que entre polvo al sistema. Las dos placas instaladas sirven de soporte tanto para la tapa superior y las dos paredes restantes, las cuales se construyen de acrílico y están unidas, formando una “U”, cuenta además con canaletas en ambos lados para poder desplazar hacia abajo usando como rieles las paredes de aluminio ya mencionadas, en la placa que funciona como tapa tiene se pegan las paredes de acrílico en ángulo recto con epoxi (ver Fig. 3.9).



**Figura 3.9:** Esquema de las paredes de acrílico, a la izquierda la tapa del láser, a la derecha una de las placas de los lados, con la canaleta para desplazarse por las placas de aluminio.

### 3.4 Determinación de ángulo de incidencia para configuración Littrow

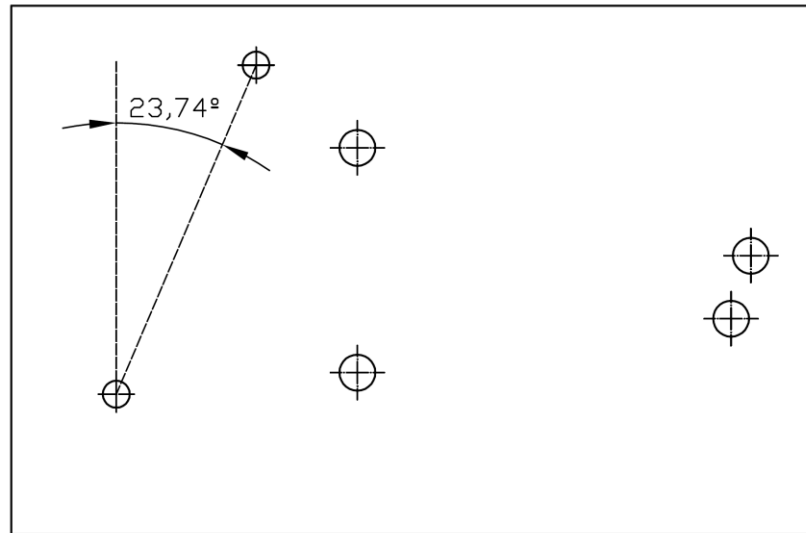
Para el diseño de las piezas y algunos de los agujeros es necesario saber algunos valores a priori, por lo cual se muestra el cálculo del ángulo de incidencia para ubicar la montura con el tubo de colimación. Dado que se construye el láser según modelo [3, se considera una red de difracción de 1200 [líneas/mm] (Edmund Optics, modelo NT43-752) de 12,7 x 12,7 x 6 [mm], la cual está optimizada para longitudes de onda en torno a los 750 [nm], sin embargo la longitud de onda en este caso es de 671 [nm], por lo que se

calcula de acuerdo a la Ec. 2.5 el ángulo para la configuración Littrow usando estos parámetros, para el primer orden de difracción ( $m=1$ )

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{671 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3}}{1200}} \right) \quad (2.17)$$

$$\alpha = 23,74^\circ \quad (2.18)$$

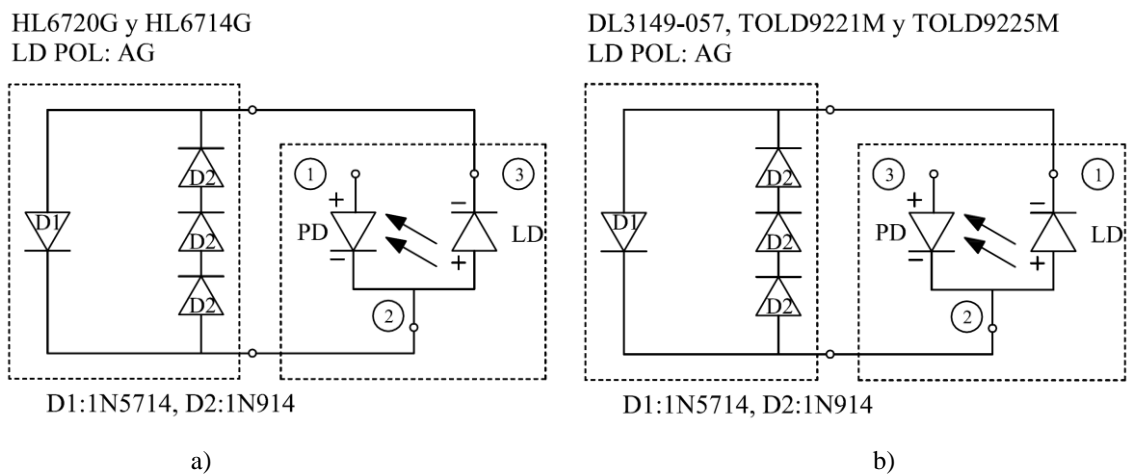
Como se muestra en la Ec. 2.18 el ángulo de incidencia es de  $23,74^\circ$ , por lo cual se diseñan los agujeros de la montura que sostiene el cilindro de forma tal que al colocar el diodo láser y el lente de colimación el haz incida sobre la red con el ángulo calculado.



**Figura 3.10:** Vista superior de base pequeña que contiene sistema óptico, se muestra ángulo correspondiente para incidencia en la red de difracción según parámetros calculados en configuración Littrow.

### 3.5 Circuito de protección de corriente del diodo láser

El diodo láser es un elemento diseñado para trabajar en cierto rango de corriente, además el diodo láser descubierto es altamente sensible a la estática, por lo que para su manipulación se deben tomar las medidas necesarias, usando por ejemplo pulsera antiestática y evitando el contacto directo con los terminales del diodo láser. Con el fin de prolongar su vida útil y proteger al diodo láser se aconseja conectarle un diodo protector de polarización inversa, el cual protege de manera efectiva de las alzas de tensión que un diodo láser puede tolerar de vuelta, es por ello que siguiendo usando el modelo [3] se construye este circuito de protección de corriente.

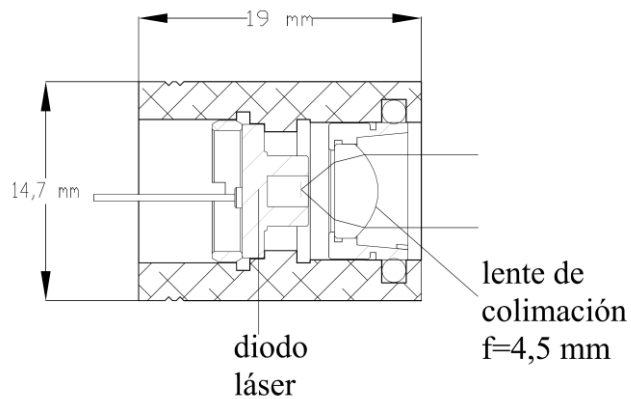


**Figura 3.11:** Circuitos de protección de corriente, a) conexión para diodo láser en uso y otro modelo con la misma configuración y polaridad AG, b) se observa el mismo tipo de conexiones pero para diodos láser con configuración física distinta al caso anterior respecto de sus terminales, pero son polaridad AG. también.

En la Fig. 3.11a) se detallan los diodos láser que se pueden conectar usando el circuito de protección ubicado bajo la lista, en donde los terminales 2 y 3 se conectan al circuito, en la Fig. 3.11b) hay otra lista con diodos láser que se pueden usar, la diferencia es que se conectan la circuito de protección de corriente los terminales 1 y 2. Ambas listas son de diodos láser con polaridad AG y cuya longitud de onda está en torno a los 670 [nm].

### 3.6 Colimación del haz

La salida del haz del diodo láser es divergente como se observó en la Fig. 2.3, forma con la cual no puede ser usado en cualquier experimento sin una colimación. La Fig. 3.12 muestra el diodo láser y el lente esférico de focal  $f=4,5$  [mm] dentro del tubo de colimación, que tiene un largo de 19 [mm]. El lente puede ser girado dentro del tubo para encontrar la focal y con ello dejar colimado el haz, lo que se hace observando la salida en el campo lejano (far-field) y comparando con el spot a la salida del tubo de colimación.



**Figura 3.12:** Esquema del diodo láser y el lente esférico dentro del tubo de colimación.

La distancia para evaluar la colimación del haz fue de aproximadamente un metro y medio, obteniéndose un haz elíptico de aproximadamente 1 [mm] para el semieje menor y 3 [mm] para el semieje mayor tanto a la salida del tubo como en el campo lejano.

### 3.7 Alineación del haz

Luego de tener colimado el haz se ubica la red de difracción en la montura en “U” diseñada, la que a su vez está soportada por la montura KMS y ésta sujeta a la “L” de aluminio que permite el desplazamiento lineal (ver Fig. 3.4). Dado que el haz está colimado y a una altura constante respecto del banco óptico al momento de colocar la red y buscar el ángulo para la configuración Littrow, primero se observa si el haz sale a la misma altura, ya que topando uno de los tornillos tip/tilt de la montura KMS se

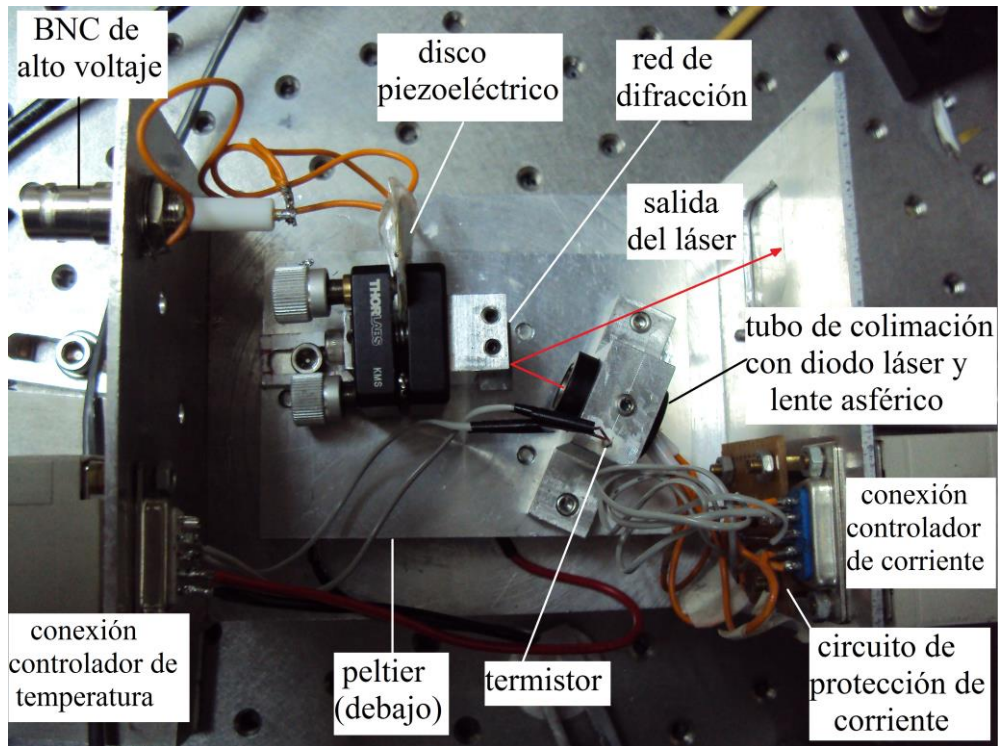


coloca el piezoeléctrico de disco (ver Fig. 3.13) alterando tal altura y luego se estudia la retroalimentación óptica producida por el primer orden de difracción hacia el diodo láser, el orden cero de difracción es el que sale del láser y permite evaluar tal retroalimentación, ya que a simple vista se aprecia cómo el láser comienza a lasear a una corriente más baja que la corriente umbral del diodo láser cuando está sin retroalimentación, es por ello que la red permite la generación de luz láser y emisión estimulada a una corriente mas baja al moverla, con lo cual se cambia el ángulo de incidencia hasta optimizarlo. Un alineamiento vertical preciso del haz que se devuelve se hace reduciendo la corriente del diodo hasta el umbral, entonces se observa la intensidad de salida del haz mientras se ajusta el ángulo de la red en el eje vertical. Si el alineamiento preliminar para la configuración Littrow fue el adecuado, el haz de salida podría aumentar significativamente su brillo en la posición vertical exacta que optimiza la retroalimentación en el diodo, después la corriente umbral será mas baja que en la última medición efectuada [3].

### 3.8 Controladores de corriente y temperatura

El diodo láser necesita una fuente de corriente estable y con un bajo ruido, es por ello que se usa un controlador de corriente comercial (Thorlabs, modelo LDC205B), con un rango de corriente de 0 a 500 mA/ 10 V, suficiente para la características de los diodos láser disponibles para 671 [nm] que tienen una corriente límite que para nuestro caso no supera los 70 [mA]. El controlador de corriente posee en la parte posterior una salida BNC llamada “CTL OUT” que entrega una señal de 0 a  $\pm 10$ [V] dependiendo de la corriente que se aplique al diodo láser, también tiene un conector BNC que permite la modulación o control análogo de la corriente llamado “MOD IN”. Mientras que el controlador de temperatura (Thorlabs, modelo TED 200) regula y estabiliza la temperatura por largos períodos para una operación eficiente del láser de cavidad extendida. El sistema consiste de un Peltier y un termistor (NTC Thermistors, modelo TH10K), ya que el controlador tiene una fuente que entrega la corriente al Peltier, dependiendo de la temperatura que el termistor entrega como voltaje y permite regular el

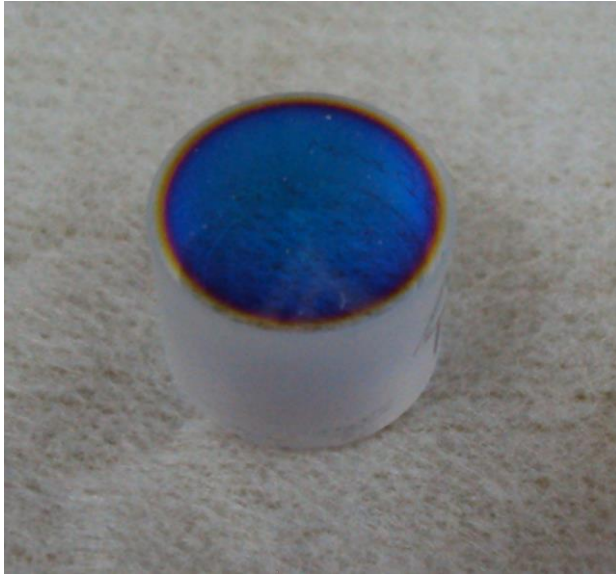
sistema, ya que el controlador es un PID. En la Fig. 3.13 se muestra una vista completa del láser con los elementos descritos y las conexiones para los controladores de corriente y temperatura.



**Figura 3.13:** Fotografía con vista superior del láser construido, sus elementos, un esquema de la salida del láser y las conexiones correspondientes.

### 3.9 Construcción de montura para espejo y piezoeléctrico del interferómetro Fabry-Perot confocal.

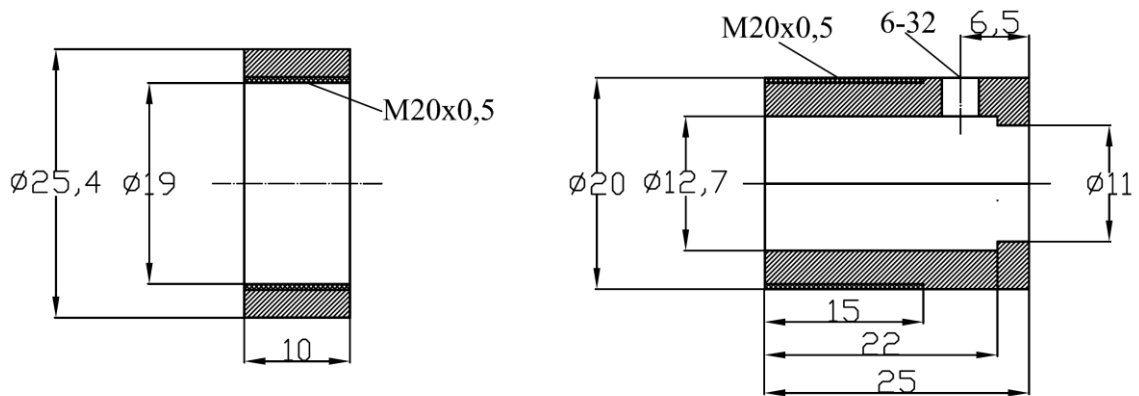
Los espejos usados (VLOC, modelo ROC=25 mm CC, SMC12.7-9.525-25FS-3028-671-0) de 99,5 % R/AR) tienen un radio de curvatura de 25 [mm], un diámetro de 12,7 [mm], 9,525 [mm] de largo y recubrimiento optimizado para 671 [nm], ver Fig. 3.14.



**Figura 3.14:** Fotografía de uno de los espejos utilizados en la construcción del interferómetro.

La montura se construye en base a descripciones de Boyd, Bliss, and Libbrecht [4], en donde se tiene un cilindro de 25,4 [mm] de diámetro externo y un largo de 25,2 [mm], ver Fig. 3.15, en su interior tiene diferentes diámetros, todos concéntricos, diseñados para todos los elementos usados, de izquierda a derecha se tiene un diámetro para un anillo de goma (O-ring), luego hay un diámetro menor que funciona como tope del O-ring, permite que el espejo se centre con este anillo y también el espacio suficiente para que el cable de alimentación del manto exterior sea conectado sin problema y no haga contacto con el cilindro de duraluminio, luego se tiene un tercer diámetro que permite el centrado del piezoeléctrico cilíndrico hueco (Channel Industries, modelo C5500, tipo lead zirconate titanate) y finalmente un diámetro menor que funciona como tope del piezoeléctrico y salida del láser, además se tiene un agujero que permite la salida del cable de alimentación del piezoeléctrico. La instalación de estos elementos se hace soldando los terminales al piezoeléctrico y luego pegando cuidadosamente con epoxi el borde del cilindro piezoeléctrico con el espejo.



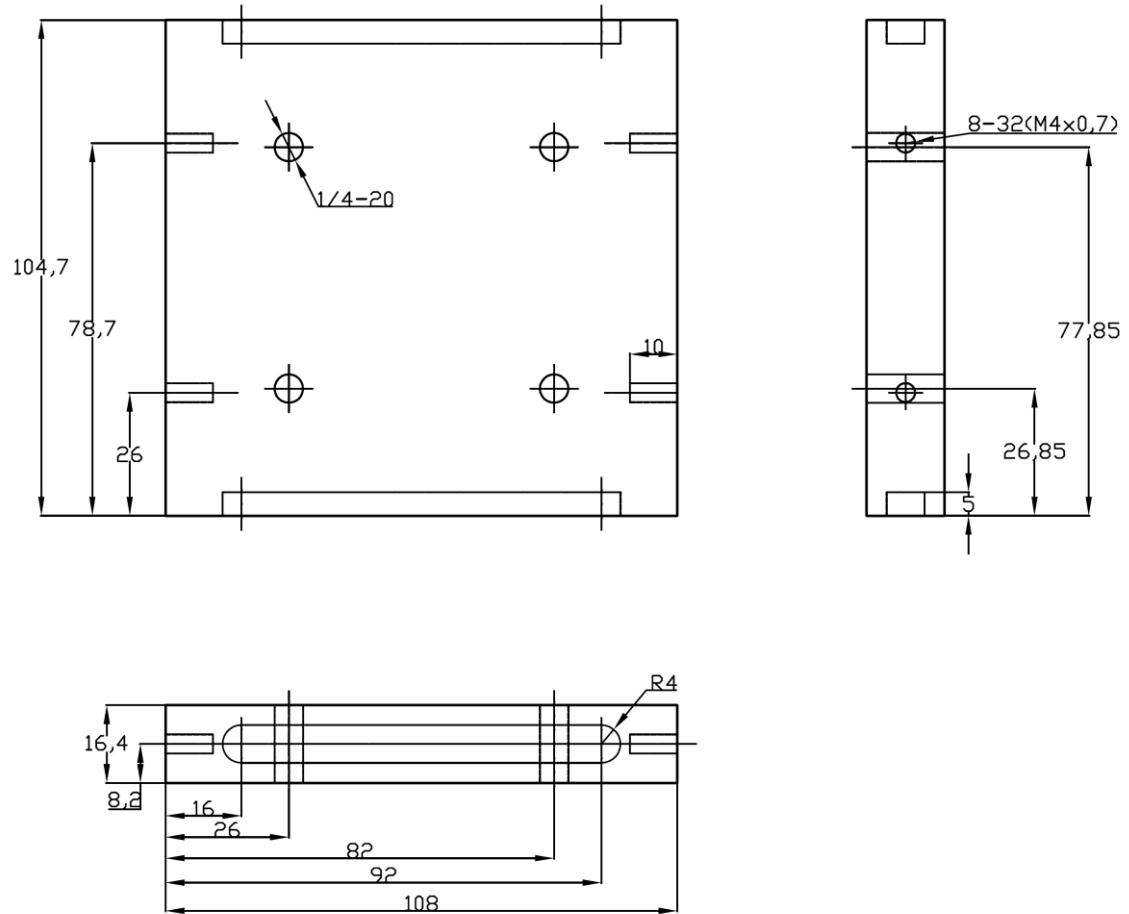


**Figura 3.16:** Montura para espejo y cilindro con hilo interior, en el lado izquierdo el anillo con hilo interior, a la derecha la pieza porta-espejo con hilo exterior M20 x 0,5, diámetro menor para tope del espejo y paso de la luz y agujero con hilo 6-32 para sostener el espejo.

### 3.11 Diseño y construcción de placa base del interferómetro

En la sección 3.9 y 3.10 se mostró el diseño y construcción de las piezas que contienen los espejos y el piezoeléctrico del interferómetro que son ubicados en 2 monturas (Thorlabs, modelo KM100) de 25,4 [mm] de diámetro donde entran los cilindros antes vistos, la montura KM100 está soportada sobre cilindro de aluminio que tiene hilo para sujetar la montura y en la parte inferior también tiene hilo para fijarlo a la base (Thorlabs, modelo BA2), éstas bases permiten un ajuste grueso de los espejos respecto a la búsqueda de la distancia confocal y se atornillan en la placa base del interferómetro, construida en duraluminio está diseñada para dos objetivos distintos, primero permitir el transporte del interferómetro alineado a cualquier parte de la mesa óptica sin perder tal alineación ya que ambas bases BA2 están atornilladas a esta placa, a diferencia de modelos anteriores que cada montura con el espejo respectivo se ubicaban de manera independiente directamente en la mesa óptica, lo que no permitía un transporte sin perder la alineación, segundo, la placa sirve además como soporte a la caja que se construye para proteger el sistema y evitar el paso de luz desde el laboratorio que no corresponde al láser. La placa tiene entonces cuatro agujeros con hilo de 1/4 de pulgada

y en cada uno de sus extremos tiene 2 agujeros con hilo 5-32 para atornillar las placas frontal y posterior de la caja.

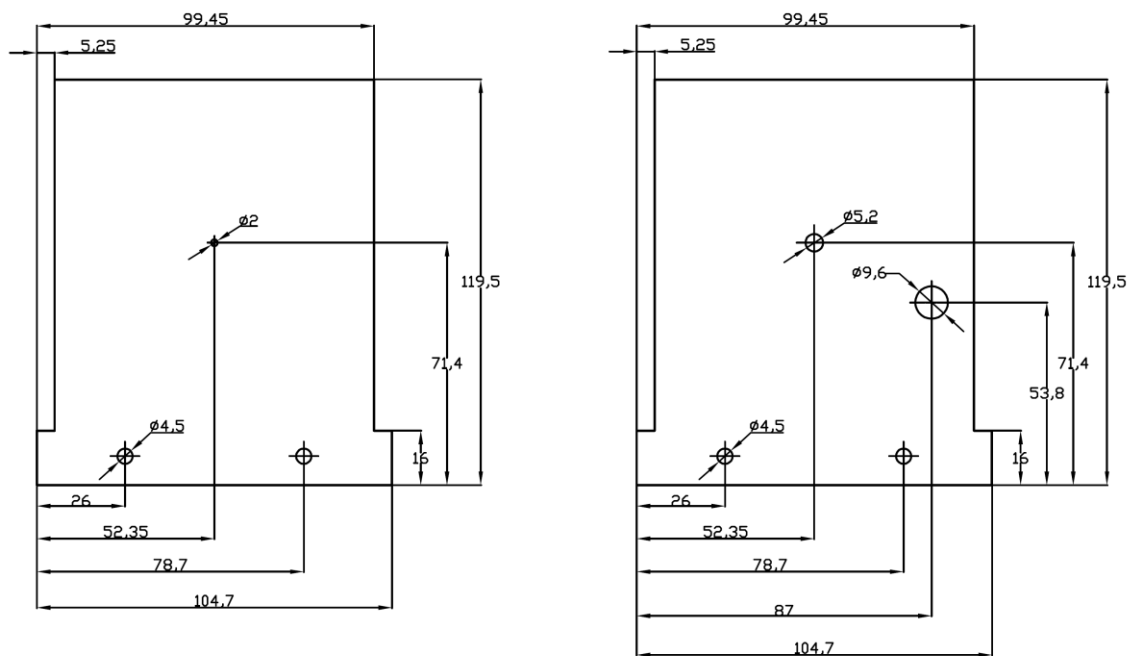


**Figura 3.17:** Placa base del interferómetro, donde se ubican las bases BA2 que sostienen los espejos del interferómetro, usando 4 tornillos con hilo 1/4-20.

### 3.12 Diseño y construcción de caja para el interferómetro

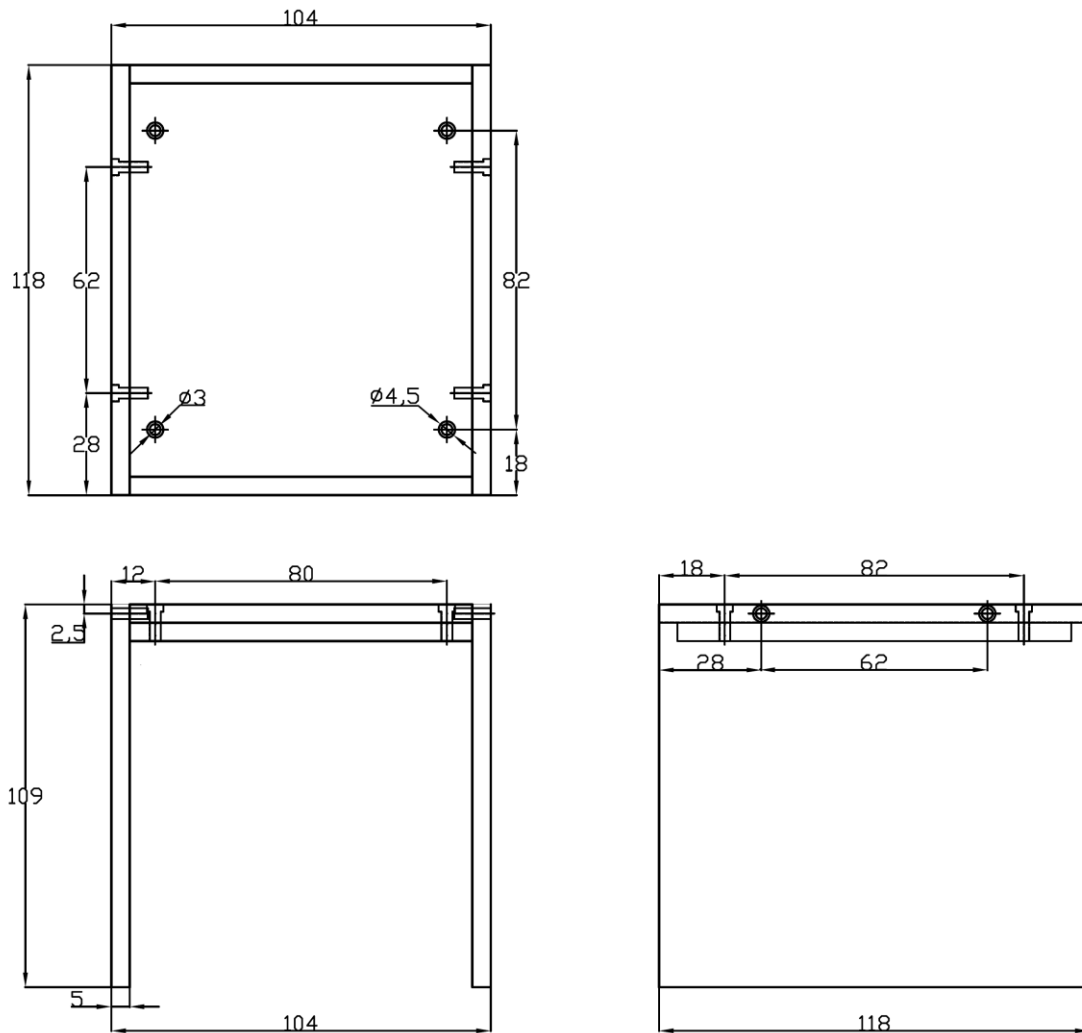
Como se había anticipado la placa base del interferómetro se utiliza para dar sustento a la caja de protección y aislación de luz, el diseño es similar a la caja del láser, pero esta vez se busca que entre sólo la luz del láser por el agujero de entrada del interferómetro usando aluminio para la caja completa. La placa frontal tiene un agujero central diseñado para la entrada de la luz del láser además de los agujeros por los cuales pasan

los tornillos que la sostienen ajustándola a la placa base, la placa posterior tiene un agujero de salida a la misma altura que el de entrada, pero con un diámetro mayor que permite captar toda la luz que sale del interferómetro, además de tener un agujero para colocar el conector BNC de alto voltaje a través del cual se alimenta el piezoeléctrico que desplaza el espejo y los dos agujeros para fijarla a la placa base, ambas placas tienen en su parte inferior una pestaña que soporta la estructura en forma de U que se coloca encima. Para una correcta ubicación de los agujeros de entrada y salida del láser, es posible hacerlos una vez que el sistema está alineado, para ello se sacan las placas frontal y posterior y se marca en las mismas el punto central del haz a la entrada y salida del interferómetro.



**Figura 3.18:** Placas frontal y posterior de la caja del interferómetro.

La estructura en forma de “U” se diseña con una placa de aluminio de 5 [mm] de espesor, en donde se tienen dos caras iguales que soportan la tapa, la cual tiene doble placa para dar mayor rigidez a la caja y actúa como tope para que la caja no se desplace hacia los extremos del interferómetro. El diseño completo se observa en la Fig. 3.18.



**Figura 3.19:** Tapa en “U” para el interferómetro, las placas usadas son de aluminio de 5 [mm] de espesor, se usan tornillos M3 unir las placas.

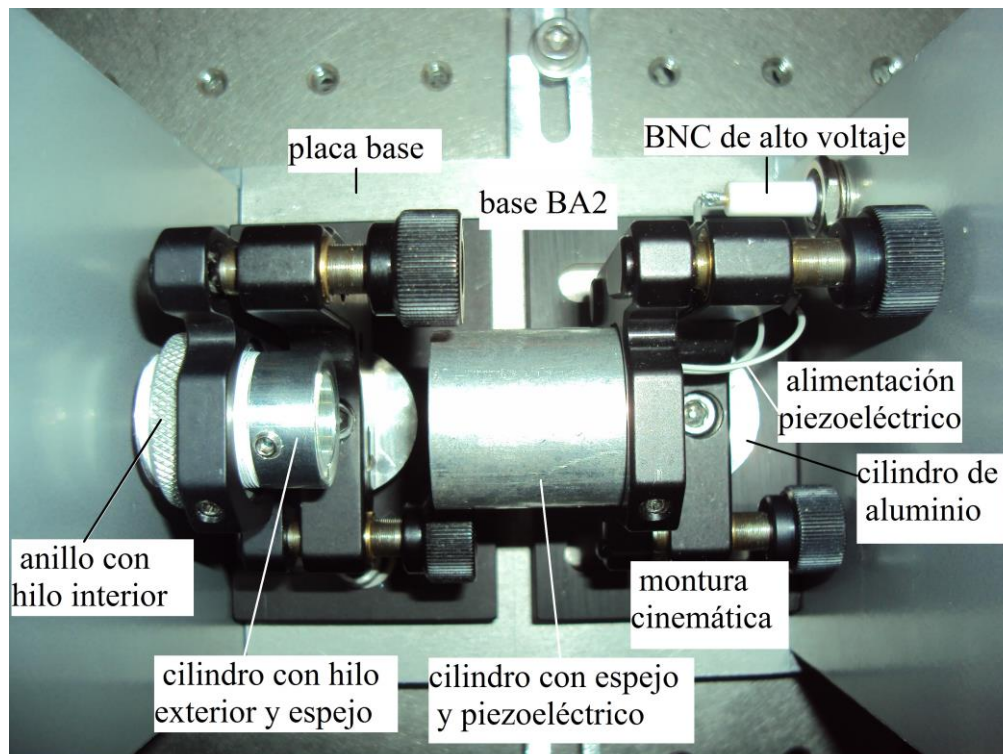
### 3.13 Conexión del piezoeléctrico del interferómetro y consideraciones útiles

La alimentación para el piezoeléctrico se hace por medio de una fuente de alto voltaje (Trek, modelo PZD700), capaz de entregar de 0 a 700 V, la fuente necesita de una señal de entrada que se obtiene de un generador de señal (Protek, modelo 9205C), la salida



BNC de la fuente de alto voltaje se conecta al BNC de alto voltaje ubicado en la placa posterior de la caja y desde allí se alimenta el piezoeléctrico (ver Fig. 3.19).

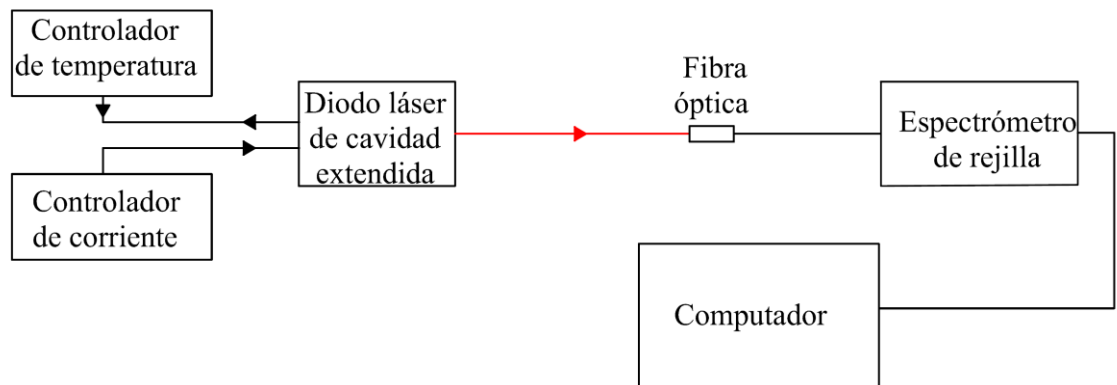
Para que ambos espejos estén a la misma altura las monturas cinemáticas KM100 se colocan cada una sobre un cilindro de aluminio que tienen las mismas dimensiones respecto a la altura principalmente, ya que fueron maquinados juntos, ajustando las bases BA2 se llega de forma gruesa a la distancia confocal de 25 [mm] en este caso, luego se gira el cilindro con hilo exterior que contiene el espejo para dar un ajuste más fino de esta distancia.



**Figura 3.20:** Configuración del interferómetro construido y conexión BNC de alto voltaje para el piezoeléctrico.

### 3.14 Experimento para medición de la longitud de onda del láser con espectrómetro de rejilla

Después de construido el láser de cavidad extendida se debe comprobar si está emitiendo luz láser en torno a la longitud de onda de absorción del litio, esto es 670 [nm]. Lo cual se hace estudiando la salida del láser con un espectrómetro de rejilla de baja resolución, (Thorlabs, modelo SP2-USB). El montaje para al medición se muestra en la Fig. 3.21.



**Figura 3.21:** Montaje experimental para medición de la longitud de onda del láser.

### 3.15 Método de medición de los modos del láser usando interferómetro Fabry-Perot confocal

Para estudiar el comportamiento modal del láser es necesario hacer un barrido en torno a la distancia confocal del interferómetro, es por ello que en este caso se usa la fuente de alto voltaje para alimentar el piezoeléctrico cilíndrico hueco que desplaza el espejo del interferómetro, de forma tal de aplicar el voltaje necesario para ver por lo menos dos máximos de interferencia que permiten hacer los cálculos de la finesa experimental del interferómetro y a la vez observar los modos del láser, de acuerdo al siguiente método.

- a. Para alineación y colimación del láser dentro de la cavidad usar procedimiento descrito en secciones 3.6 y 3.7.

b. Con el fin de obtener un haz que tenga la misma altura que el eje óptico del interferómetro se instalan dos espejos, próximos a la salida del láser, el primero se ubica a  $45^\circ$  del eje óptico del láser, lo que permite llevar el haz hacia arriba, donde se ubica el segundo espejo que está a  $45^\circ$  respecto del haz desviado, quedando ahora el haz a la misma altura que el eje óptico del interferómetro.

c. Teniendo el haz a la altura deseada se hace un camino óptico formado por dos espejos más para llegar para llegar al interferómetro, esto se hace debido a que mientras mayor sea el camino óptico más fácil será tener buenos resultados y una finesa más alta.

d. Con el haz llegando al interferómetro es necesario alinear el propio interferómetro, procedimiento que se detalla a continuación.

d.1. El haz entra al interferómetro y se refleja en el segundo espejo, para observar que el haz se está devolviendo por el eje óptico se coloca entre los dos espejos una tarjeta blanca con un agujero de 1 [mm] aproximadamente que permite el paso de luz, si el haz reflejado se observa en la tarjeta implica que no se está devolviendo por el eje haciendo necesario al ajuste del segundo espejo con los tornillos tip/tilt de la montura KM100 hasta que la luz se devuelva por el eje y por ende por el agujero de la tarjeta.

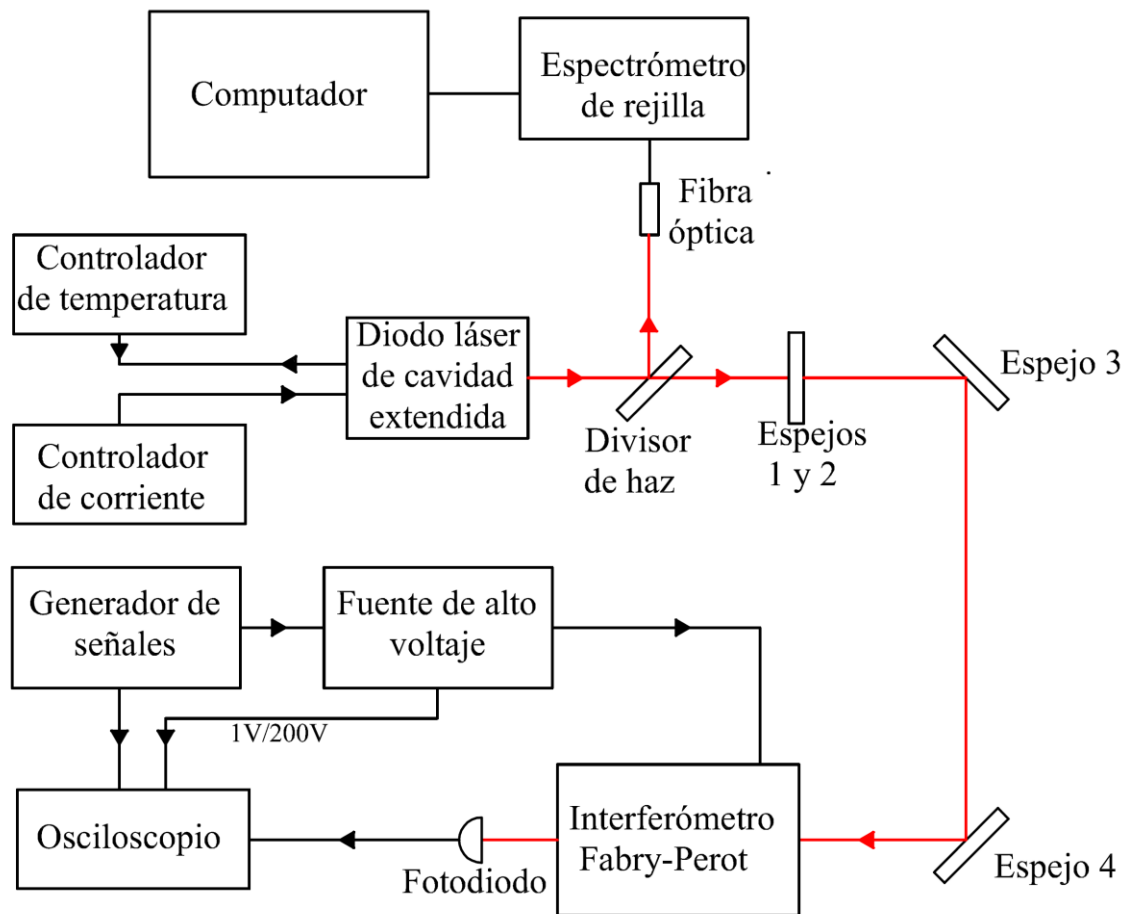
d.2. Después de alineado el segundo espejo se usa nuevamente la tarjeta, pero ahora se observa el reflejo del primer espejo hasta lograr que pase por el eje óptico, en caso de estar muy desalineados los espejos se debe iterar entre los pasos d.1. y d.2. Así al tener ambos espejos alineados se logrará observar un spot muy pequeño a la salida del interferómetro.

d.3. La alineación de los espejos precede a la búsqueda de la distancia confocal entre los espejos, lo cual se ajusta gruesamente con las bases BA2 y luego con el hilo de paso 0,5 [mm] con que cuenta la montura de uno de los espejos.

e. Con el sistema alineado, la forma de saber si los espejos del interferómetro están en la distancia confocal la cual es barrida por medio del piezoeléctrico pegado al espejo, el cual se alimenta con una señal triangular proveniente de la fuente de alto voltaje, que a su vez recibe la señal del generador de funciones, se debe observar la señal de salida del interferómetro captada por un fotodiodo que amplifica la señal y se observa en el

osciloscopio. Es recomendable medir simultáneamente la longitud de onda con el espectrómetro.

Es posible hacer mediciones con un interferómetro comercial Toptica (modelo FPI100), en donde sólo se necesita hacer el procedimiento de alinear la entrada del haz, ya que la distancia confocal está ajustada. En la Fig. 3.22 se observa el montaje experimental para la medición de los modos.

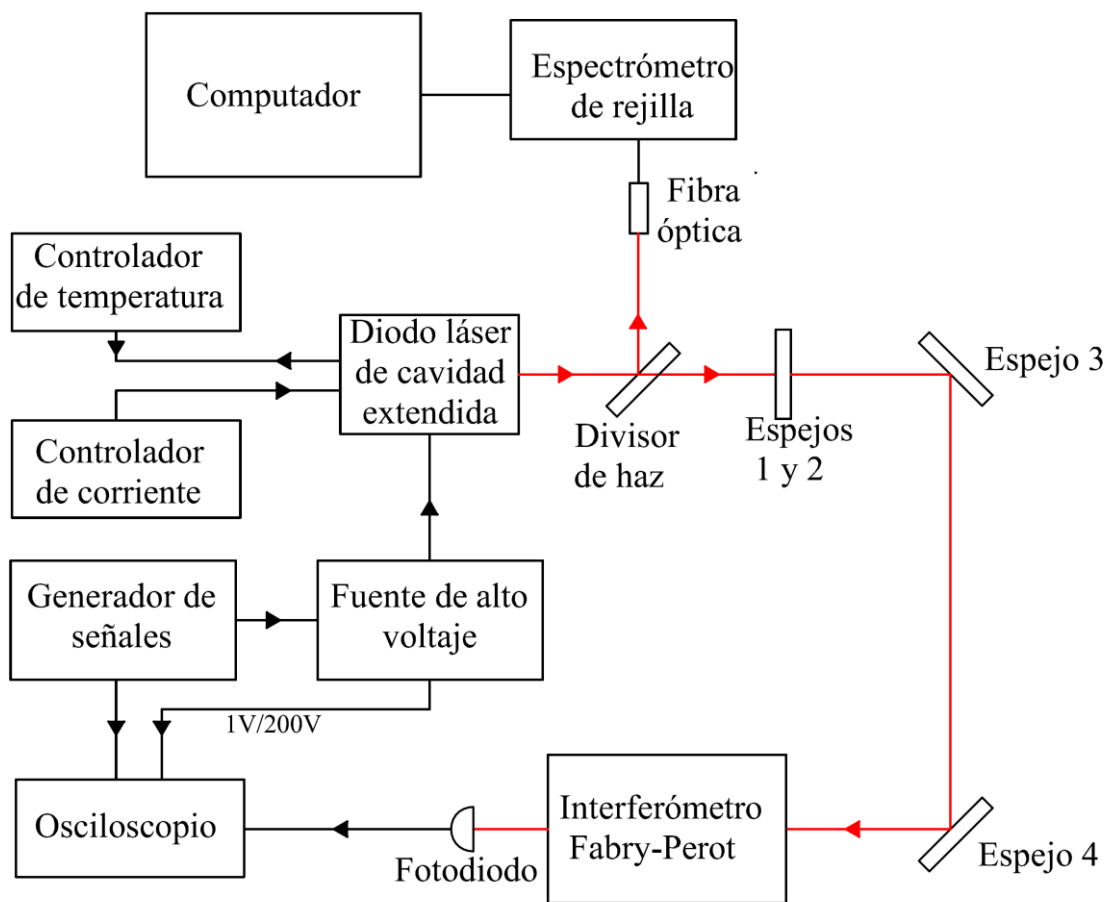


**Figura 3.22:** Montaje experimental para medición de los modos usando interferómetro Fabry-Perot confocal.

### 3.16 Método de medición del rango de barrido del láser

Para esta medición se aplica una señal triangular al piezoeléctrico que desplaza la red de difracción del láser para el barrido, pues se debe saber cual es el rango de barrido que es

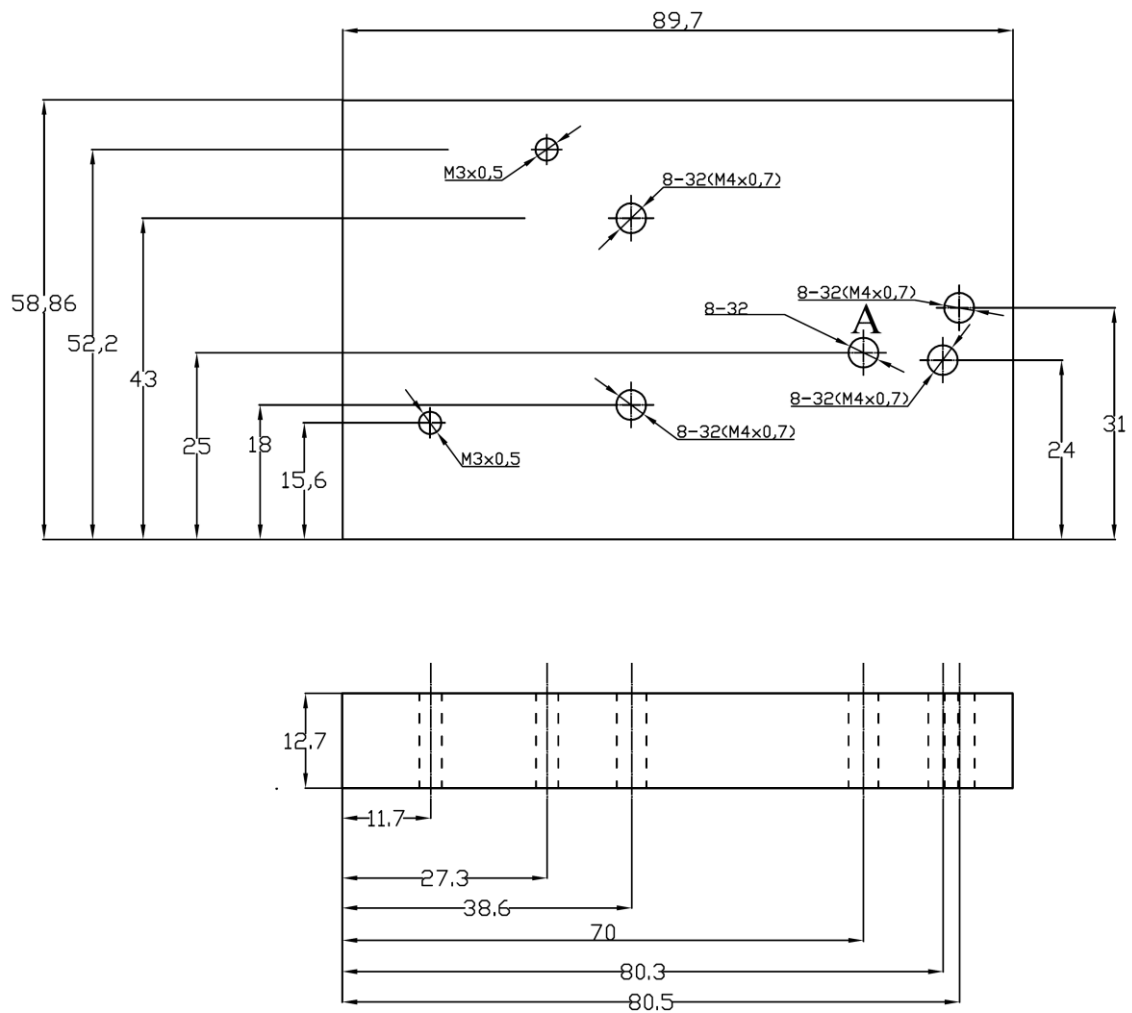
capaz de lograr el láser, libre de saltos de modos, cuando se varía la longitud y ángulo de la cavidad Littrow usando el piezoeléctrico ubicado en la montura KMS. Dado que se estudian tres modelos diferentes de piezoeléctricos, el primero es un conjunto formado por dos piezoeléctricos de disco delgados soldados, luego son reemplazados por otro de disco (Channel Industries, modelo C5500), pero más grueso, para probar finalmente un piezoeléctrico de dimensiones 3,5x4,5x10 [mm] (Thorlabs, modelo AE0203D08F) ubicado entre la bola del final del tornillo y la cara de la montura, en este caso de dos pulgadas. El diodo láser usado para estas mediciones es el TOLD9221M.



**Figura 3.23:** Montaje experimental para medición de rango de barrido del láser.

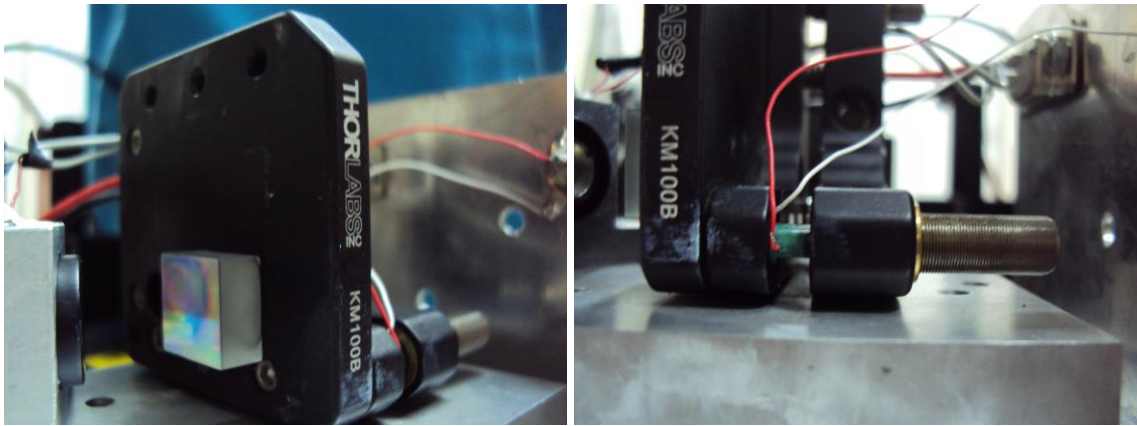
### 3.17 Modificaciones al sistema original

Dado que para medir el rango de barrido del láser se usó el piezoeléctrico Thorlabs se tuvieron que hacer modificaciones al sistema, ya que este piezoeléctrico es más largo que los de disco, por lo cual no cayó en la montura KMS y se cambió por una KM100B que se muestra en la Fig. 3.25, agregándose un agujero a la placa superior del láser, ver Fig. 3.24.



**Figura 3.24:** Placa superior, con agujero adicional para sostener montura KM100B (Thorlabs), “A” denota el nuevo agujero con hilo 8-32.

Al cambiar la montura el soporte en “U” no se pudo utilizar, por lo se decidió pegar la red de difracción usando cola fría en la cara frontal de la montura a la altura correspondiente, se decide usar cola fría ya que es lavable y en caso de cualquier inconveniente se puede retirar la red, en la Fig. 3.25 se muestra la red pegada y la ubicación del piezoeléctrico Thorlabs.

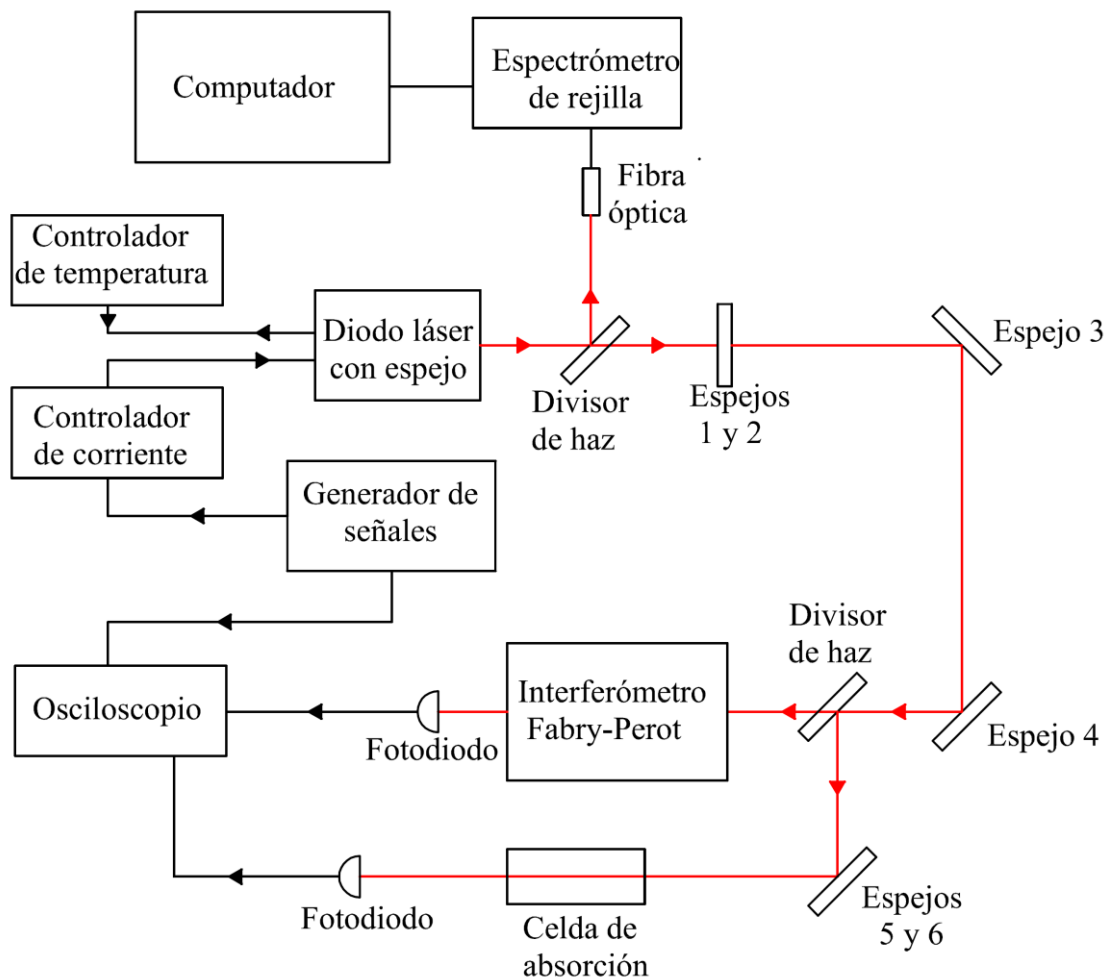


**Figura 3.25:** Fotografías usando la montura KM100B, a la izquierda la red pegada en la cara frontal de la montura, a la derecha un acercamiento a la zona donde se ubica el piezoeléctrico.

### 3.18 Método de calibración del láser usando celda de calibración

Una vez estudiado el rango de barrido del láser y observar que usando piezoeléctricos no se alcanza un barrido suficiente para observar las líneas de absorción del litio se decide sacar la red de difracción y reemplazarla por un espejo modulando sólo la corriente del diodo láser, lo cual se hace aplicando una señal triangular de baja frecuencia, en este caso, a la corriente del láser por medio de un generador de señales que se conecta al “MOD IN” con que cuenta el controlador de corriente, la precaución principal es no superar la corriente máxima que soporta el diodo láser, por ello se debe monitorear con el “CTL OUT” y comenzar aplicando una señal de baja amplitud, en la Fig. 3.26 se observa el montaje experimental para tal calibración. La celda de calibración usada es el heat pipe, el cual es un tubo con ventanas en ambos extremos capaces de soportar altas temperaturas, el tubo tiene en su interior una malla de acero con litio en estado sólido. El tubo está cubierto por un material refractario que tiene en su interior alambre de alta

resistencia eléctrica alimentado y controlado por una fuente de corriente, usa una termocupla que permite la retroalimentación del sistema y con ello la regulación de la temperatura, al calentar el tubo se produce el gas que se concentra en el centro de la celda, ya que en los extremos hay un sistema de refrigeración formado por cañerías de cobre por donde se hace circular agua, la que transfiere esta temperatura al gas buffer que se utiliza dentro de la celda, que en este caso es helio y con ello el litio que es evaporado desde el centro de la celda se condensa antes de llegar a las ventanas para volver a evaporarse.



**Figura 3.26:** Montaje experimental para calibración del láser usando celda de calibración.



### 3.19 Características de diodos láser disponibles para 670 [nm]

Las mediciones se inician usando el diodo láser HL6714G de potencia 10 [mW], una corriente umbral típica de 35 [mA], un máximo de 60 [mA], una longitud de onda típica de 670 [nm] y un rango de barrido de  $\pm 10$  [nm], con un diámetro de 9 [mm]. Se decide partir por este tipo de diodo ya que tiene una mayor potencia que los otros posibles al momento de la compra, como lo son el DL3149-57 (Sanyo) y el TOLD9221M, ambos de 670 [nm], 5 [mW] y diámetro de 5,6 [mm], ya que la pieza se construye para un diámetro de 9 [mm], siguiendo las instrucciones dadas en [3], con sus debidas modificaciones ya mostradas. Luego de hacer tales mediciones y poder adquirir más información y recursos se compra el tubo de colimación LT230P-B que cuenta con anillos de ajuste para diodos láser de 9 y 5,6 [mm], permitiendo el uso del diodo láser TOLD9221M y HL3149-057. De acuerdo a [13], en su experimento informan la prueba de varios diodos láser, pero que en configuración Littrow no se logran más de 2 [GHz] sin saltos de modos haciendo un barrido de la cavidad externa.

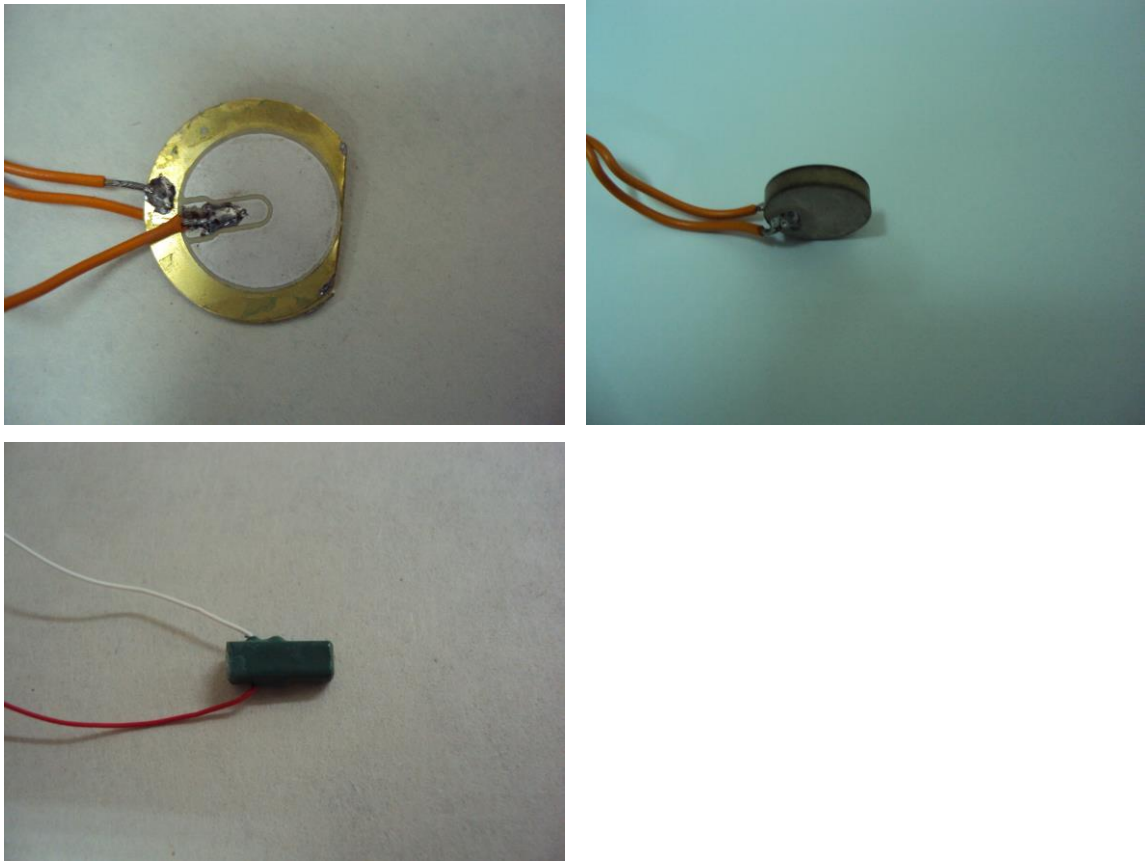


**Figura 3.27:** Diodos láser de 5,6 y 9 [mm] de diámetro.

### 3.20 Características de piezoeléctricos usados

En este experimento se mide cuanto es el rango máximo en frecuencia libre de saltos de modos del láser usando diferentes piezoeléctricos. El primero es un piezoeléctrico de disco delgado de diámetro 26,9 [mm] y espesor de 0,45 [mm], en donde se usan dos iguales, soldados para aumentar el rango de desplazamiento, del cual no se tienen

especificaciones, sólo que se alimenta con alto voltaje. El segundo piezoeléctrico usado es un disco tipo C5500 (Channel Industries) de 12,7 [mm] de diámetro y un espesor de 3,175 [mm], que según especificaciones del fabricante tiene una constante piezoeléctrica  $d_{33} = 400 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{m}{V} \right]$ , por lo tanto, el desplazamiento está definido por  $\Delta l = d_{33} \cdot V$ , entonces para un voltaje aplicado de 1000 [V] peak to peak el desplazamiento es  $\Delta l = 400 [nm]$ . Por último se usa el piezoeléctrico de dimensiones 3,5x4,5x10 [mm] (Thorlabs, modelo AE0203D08F), donde al aplicarle un voltaje de 100 [V], que es valor recomendado, se logra un desplazamiento de  $6,1 \pm 1,5 [\mu m]$ .



**Figura 3.28:** Fotografías de los piezoeléctricos utilizados para la medición de rango de barrido del láser, arriba, a la izquierda el conjunto de los dos piezoeléctricos de disco soldados, a la derecha piezoeléctrico de disco tipo C5500 y abajo piezoeléctrico Thorlabs.

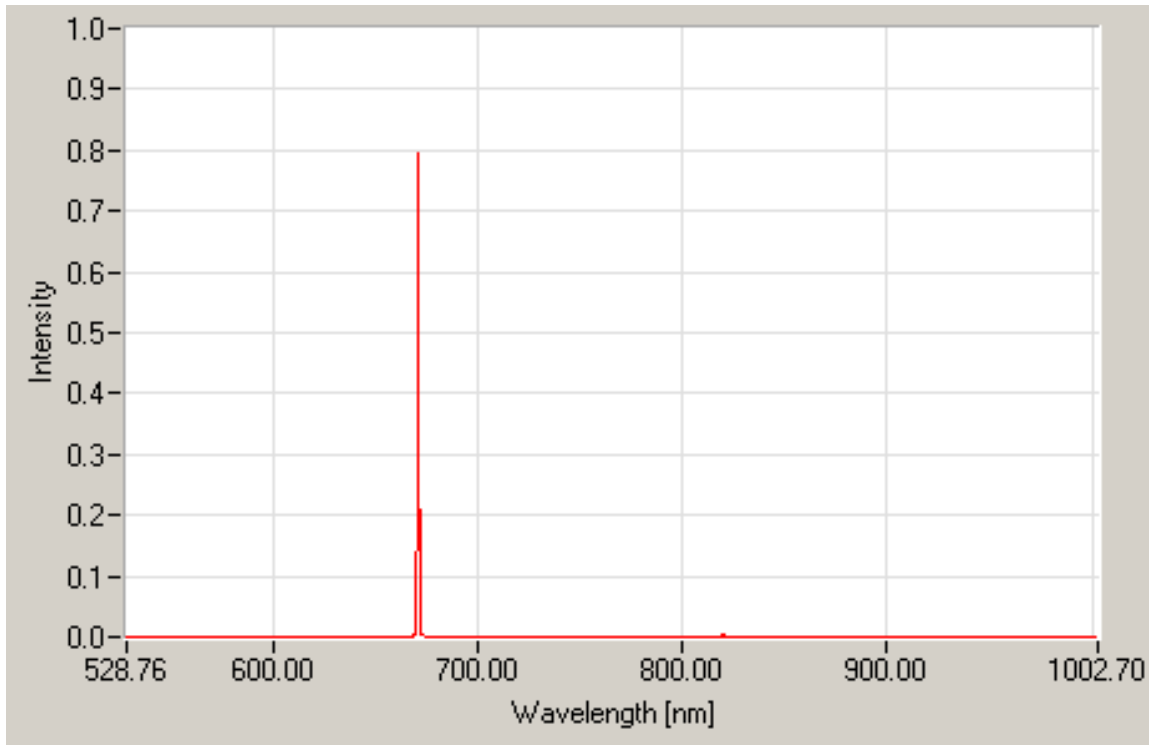
# Capítulo 4

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada experimento, usando diferentes diodos láser, piezoeléctricos e interferómetros, de forma de evaluar cual tiene un mejor desempeño, para el caso del diodo láser es muy importante su estabilidad, con el piezoeléctrico que mueve la red de la cavidad extendida interesa conocer el rango de barrido y en el caso de los interferómetros el poder evaluar si el interferómetro construido permita alcanzar mediciones similares a las obtenidas con uno comercial.

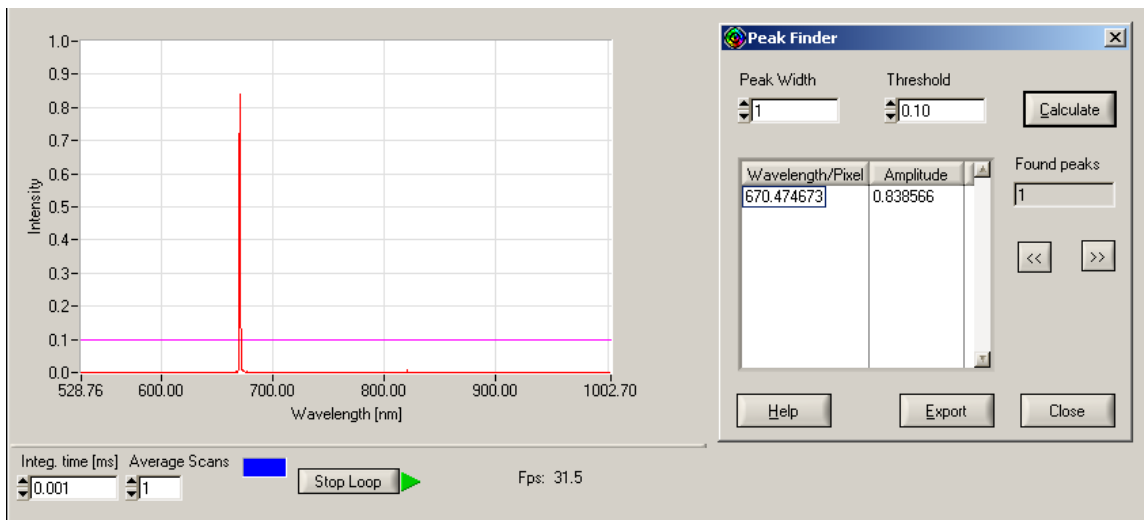
### 4.1 Medición de la longitud de onda con espectrómetro de rejilla

Para el estudio de la longitud de onda se usó el espectrómetro SP2-USB (Thorlabs), permitiendo obtener los resultados de la medición mediante el programa Splicco (Thorlabs), del cual es posible obtener una imagen, en cada caso, pero que no entrega el resultado al cual está el peak, siendo posible medirlo con una herramienta del programa, llamada Peak Finder y así conocer el valor de la longitud de onda, es por ello que se muestra la imagen y luego el valor en que se encuentra el peak.



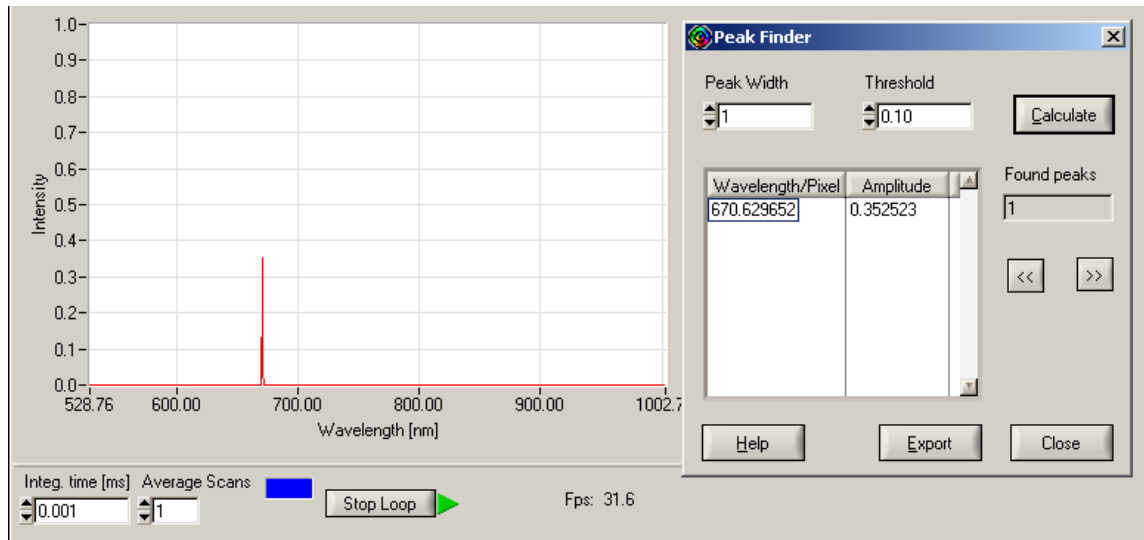
**Figura 4.1:** Imagen obtenida usando el programa Splicco, siendo posible apreciar la longitud de onda del láser.

De la Fig. 4.1 es posible apreciar que el láser se encuentra aproximadamente en torno a los 670 [nm], pero como se mencionó anteriormente, para tener certeza de la longitud de onda se usa la herramienta del programa, de lo que se tiene

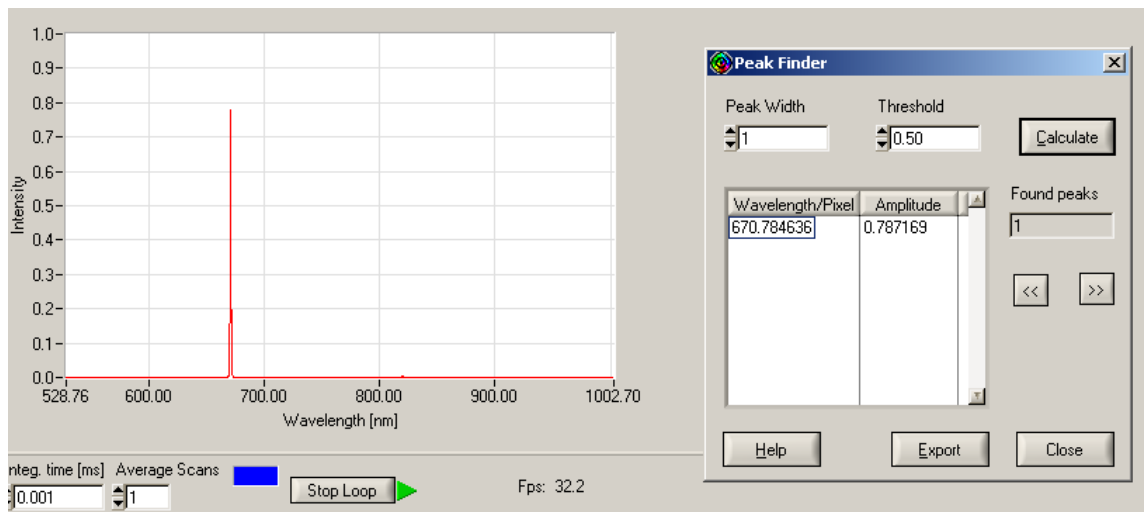


**Figura 4.2:** Imagen obtenida desde el programa Splicco, usando diodo láser Hitachi (HL6714G), con una corriente de 47,4 [mA] y temperatura de 20,3 [°C].

La Fig. 4.2 muestra que la longitud de onda en la que se encuentra el láser para las condiciones de corriente de operación y temperatura señaladas es de 670,474673 [nm]. Al variar de manera mínima los parámetros de corriente y temperatura se tiene cambios en la longitud de onda del láser (ver Fig. 4.3 y 4.4)



**Figura 4.3:** Imagen obtenida desde el programa Splicco, usando diodo láser Hitachi (HL6714G), con una corriente de 46,3 [mA] y temperatura de 20,7 [°C].

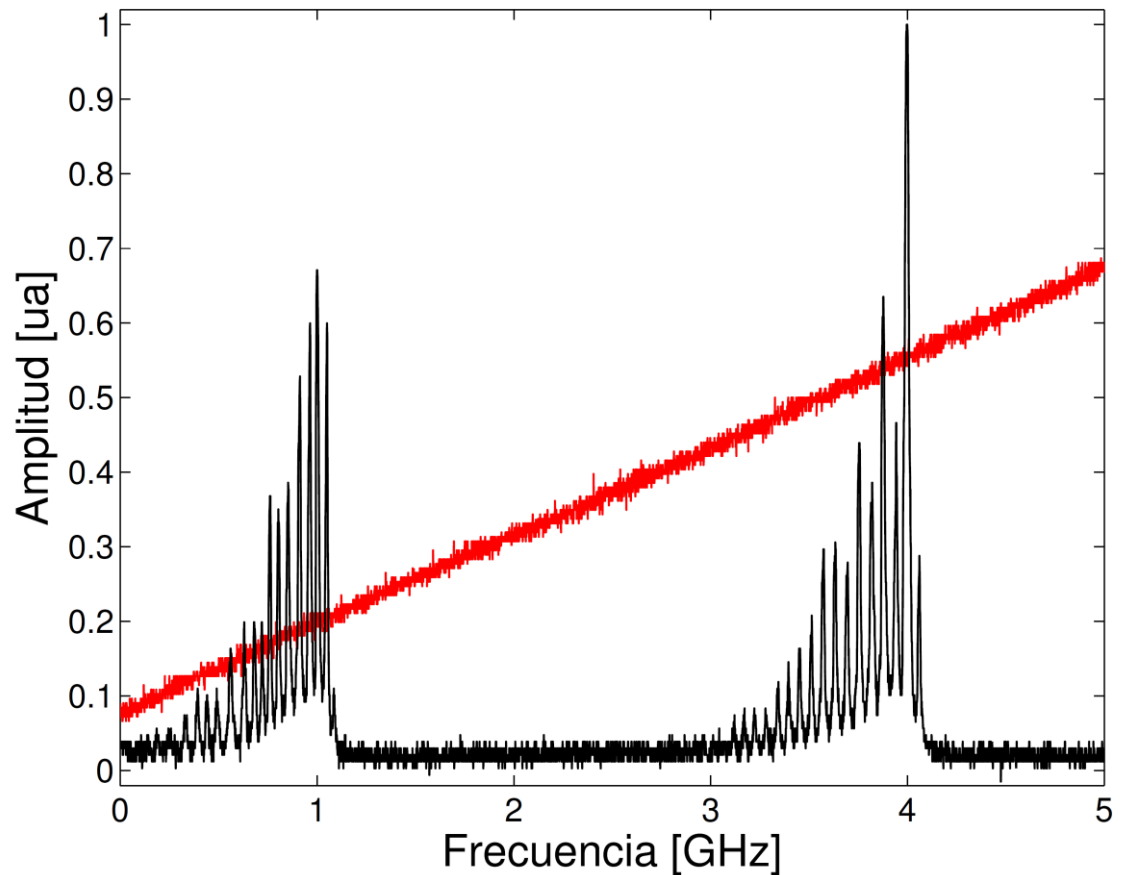


**Figura 4.4:** Imagen obtenida desde el programa Splicco, usando diodo láser Hitachi (HL6714G), con una corriente de 47,1 [mA] y temperatura de 20,7 [°C].

## 4.2 Medición de modos longitudinales del láser usando interferómetro Fabry-Perot confocal construido

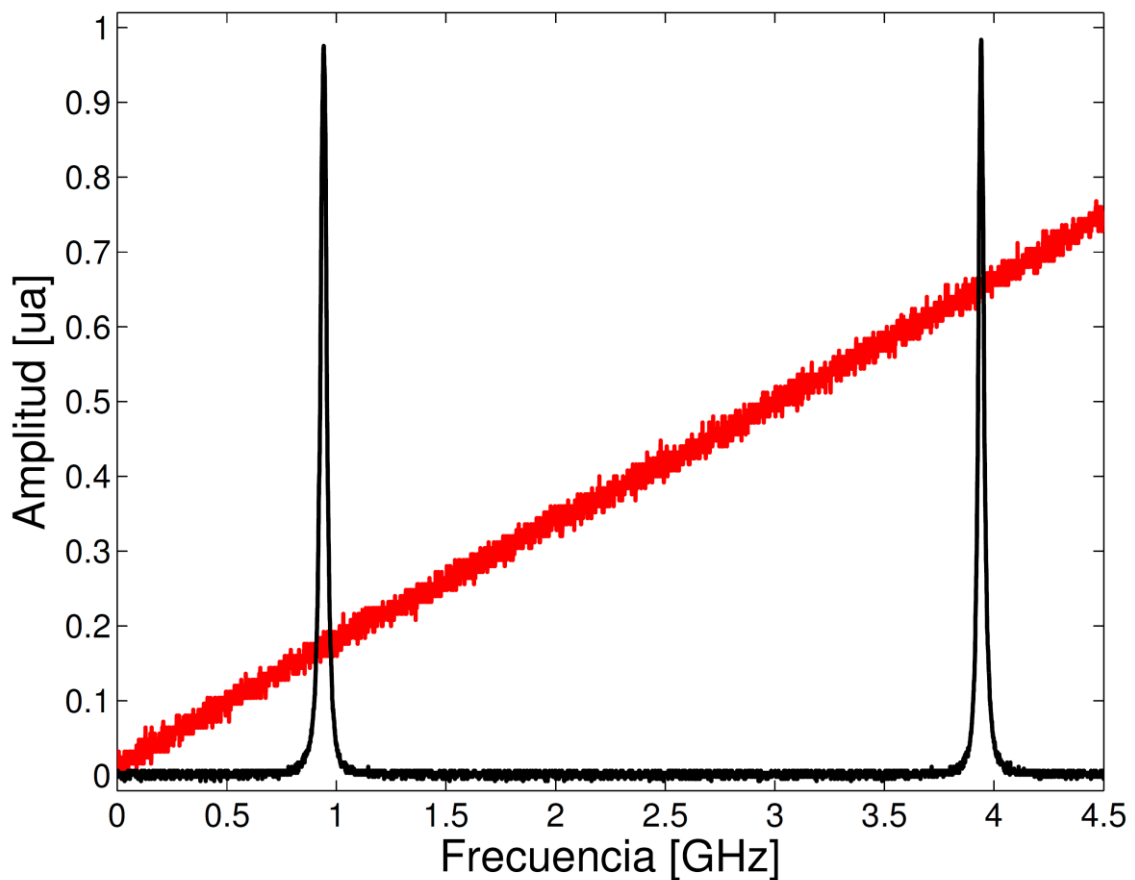
Para la medición de modos del láser se usa el interferómetro Fabry-Perot confocal diseñado y luego de tener una buena alineación se comparan los resultados con el interferómetro Toptica (FPI100).

La Fig. 4.5 muestra qué sucede cuando la distancia confocal no se ha alcanzado, por lo cual los resultados de simetría esperados no se cumplen.

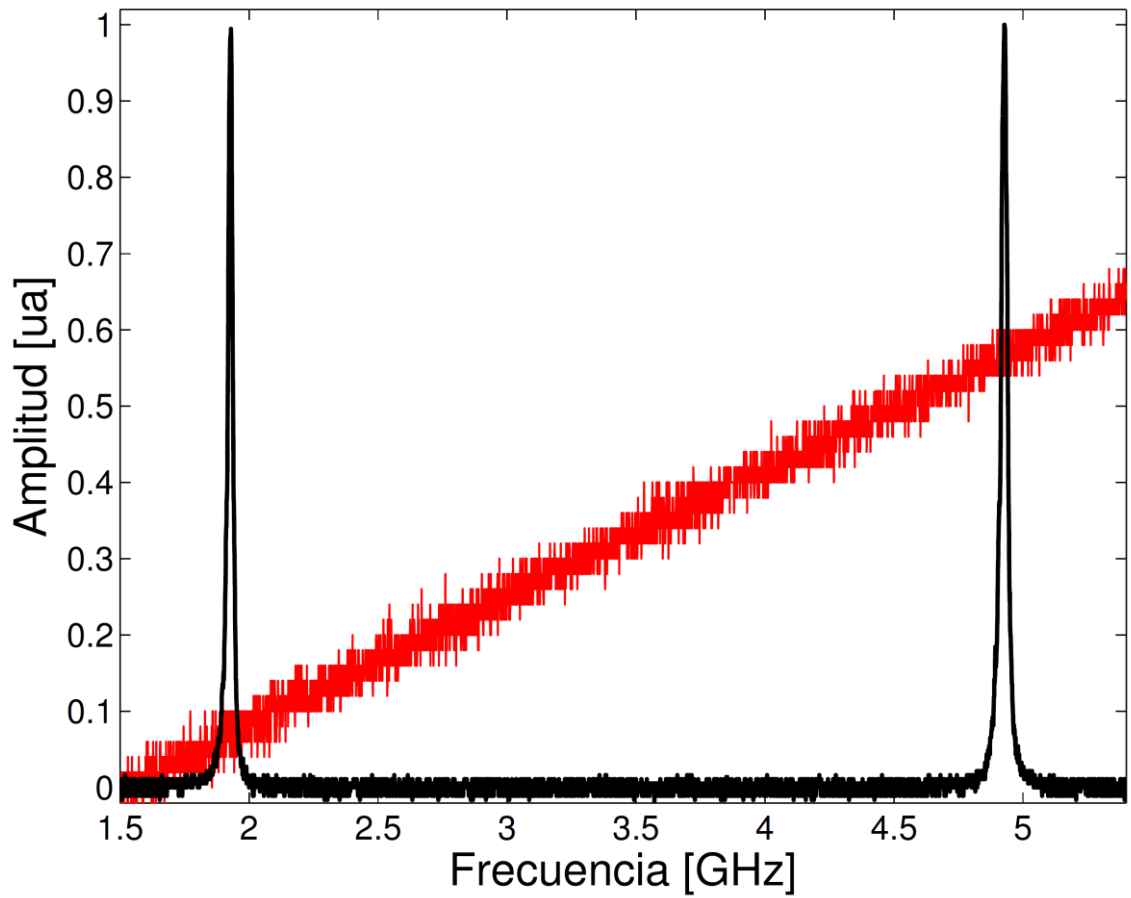


**Figura 4.5:** Modos del láser, usando diodo láser HL6714G, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del interferómetro es una señal triangular positiva de 99,2 [V] peak to peak. La cavidad no se encuentra a la distancia confocal.

Después de observar la Fig. 4.5 y según manual disponible [13] la distancia entre los espejos está desplazada 0,6 [mm], si observamos la bajada de la rampa como en el manual se indica los espejos están más lejos, en nuestro caso tenemos la subida, por lo cual la distancia entre los espejos es menor a la distancia confocal, debiendo girar el cilindro que contiene al espejo para aumentar la distancia entre ellos por lo menos una vuelta, ya que el hilo que tiene ese cilindro tiene un paso de 0,5 [mm], luego de mide nuevamente, buscando mejorar la alineación y finesa.



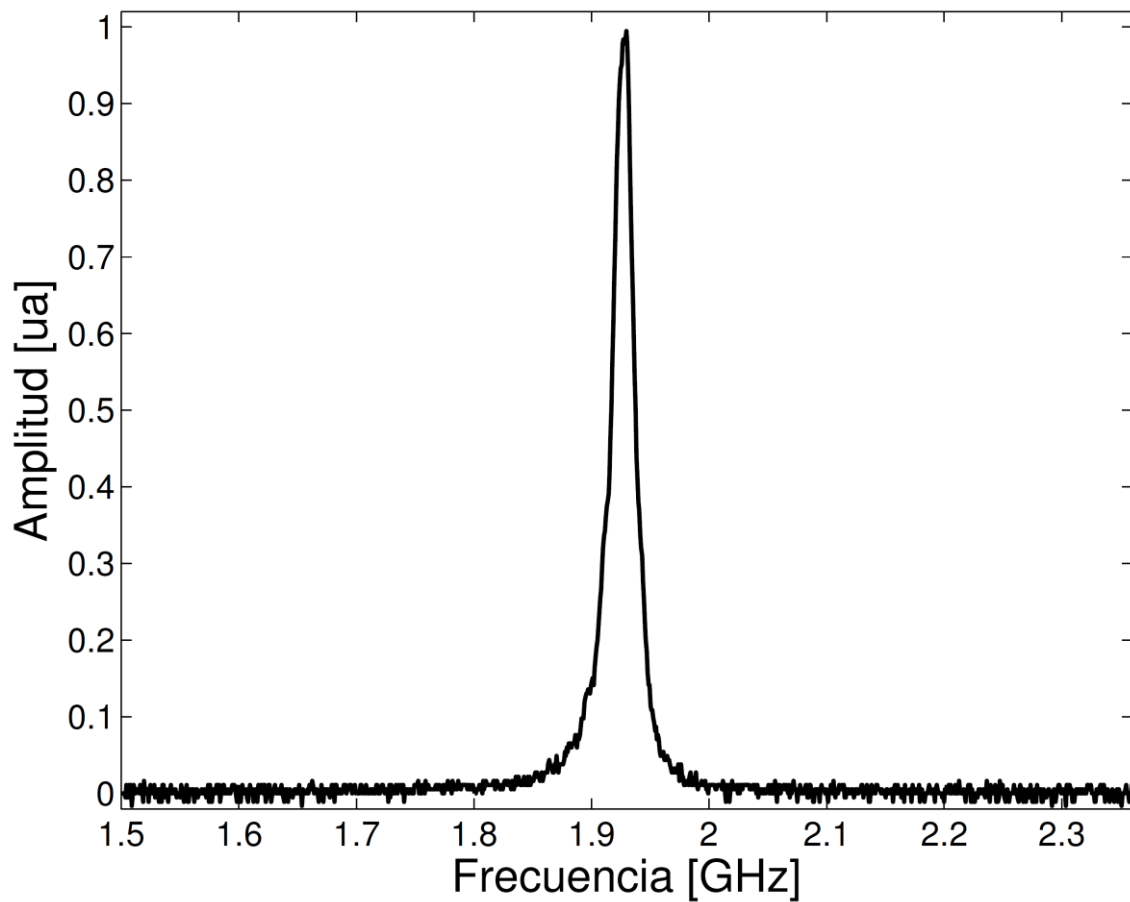
**Figura 4.6:** Modos del láser, usando diodo láser HL6714G, 46,9 [mA] de corriente de operación del láser y 20,7 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del interferómetro es una señal triangular positiva de 84,8 [V] peak to peak, 180 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 3 [GHz].



**Figura 4.7:** Modos del láser, usando diodo láser HL6714G, 46,3 [mA] de corriente de operación del láser y 20,7 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del interferómetro es una señal triangular positiva de 376 [V] peak to peak, 181 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 3 [GHz].

En la Fig. 4.7 se observan peaks finos, por lo cual se decide hacer un acercamiento al primer peak con el fin de mostrar su simetría, mostrado en la Fig. 4.8

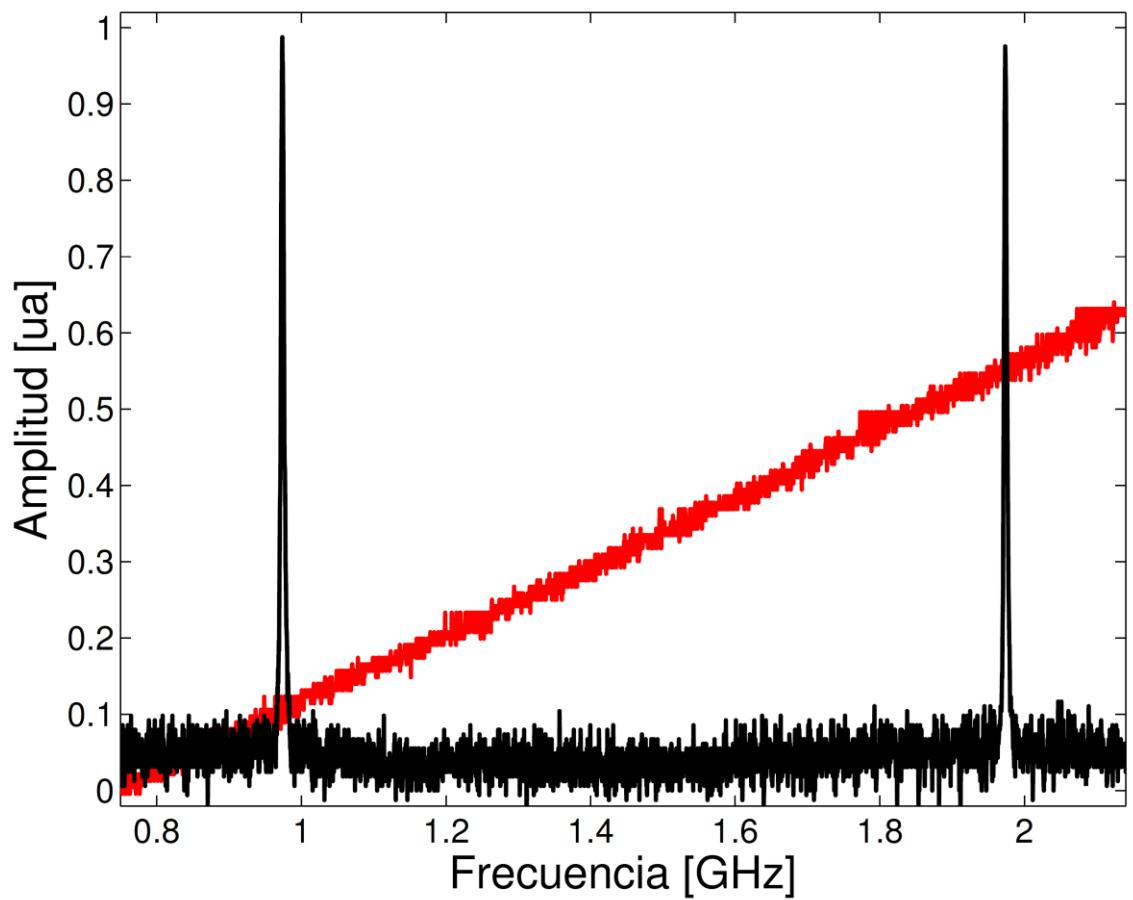




**Figura 4.8:** Acercamiento al primer peak de la Fig. 4.7, permitiendo observar su simetría.

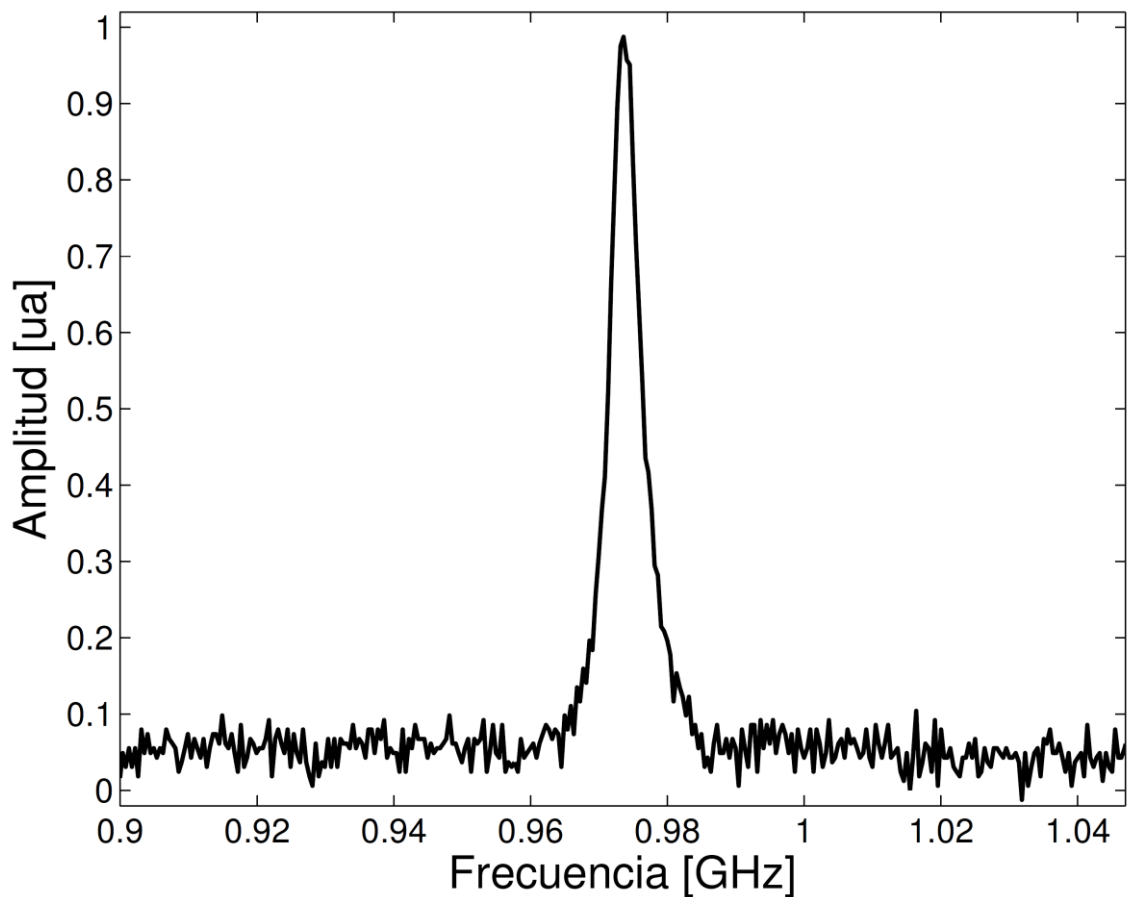
### 4.3 Medición de modos longitudinales del láser usando interferómetro Fabry-Perot confocal Toptica

Después de medir con el interferómetro construido se desea saber que tan buena es la medición alcanzada, para ello se toman datos usando el interferómetro FPI 100 (Toptica) para realizar comparaciones entre ambos interferómetros.



**Figura 4.9** Modos del láser, usando diodo láser HL6714G, 46,3 [mA] de corriente de operación del láser y 20,7 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del interferómetro FPI 100 es una señal triangular positiva de 42,8 [V] peak to peak, 100 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 1 [GHz].

La Fig. 4.9 muestra de los modos del láser construido usando in interferómetro Toptica. La Fig. 4.10 muestra un acercamiento al primer peak de la medición mostrada en la Fig. 4.9.

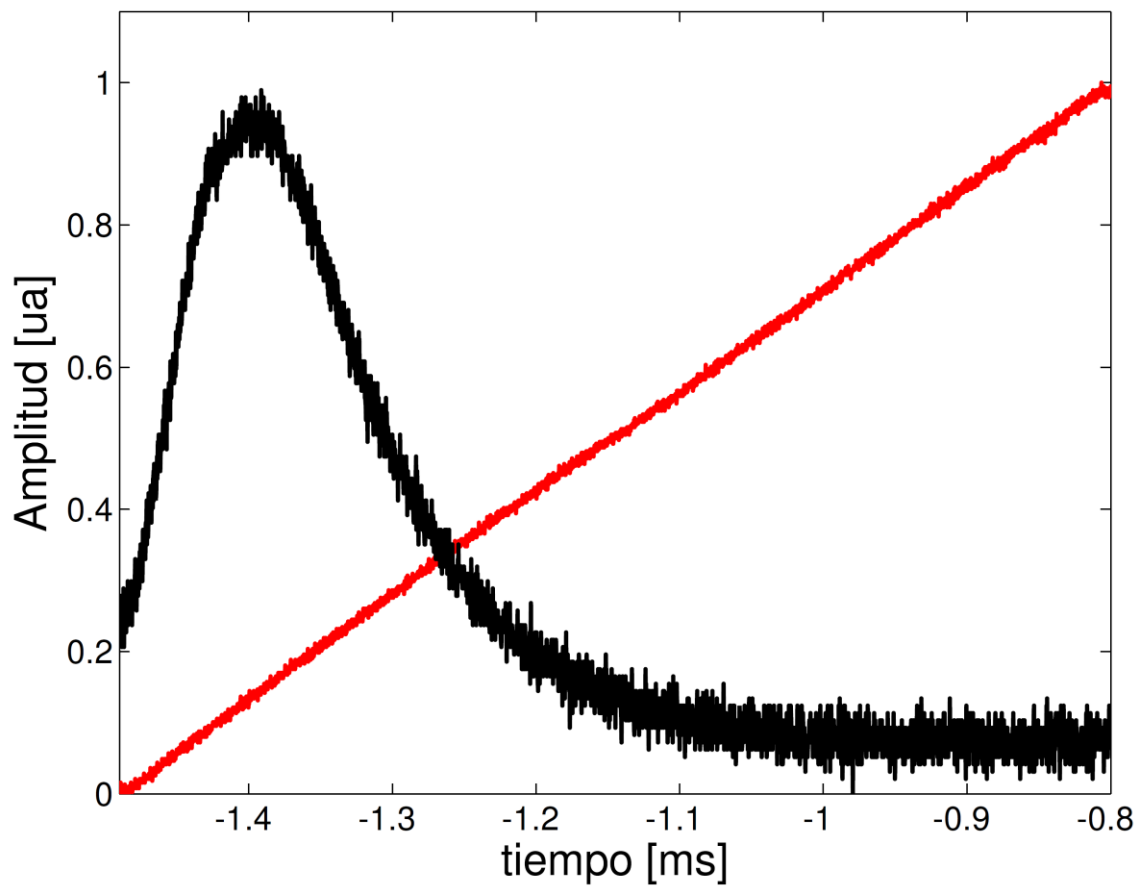


**Figura 4.10:** Acercamiento al primer peak de la Fig. 4.9, permitiendo observar su simetría.

#### 4.4 Medición del rango de barrido del láser usando diferentes piezoeléctricos

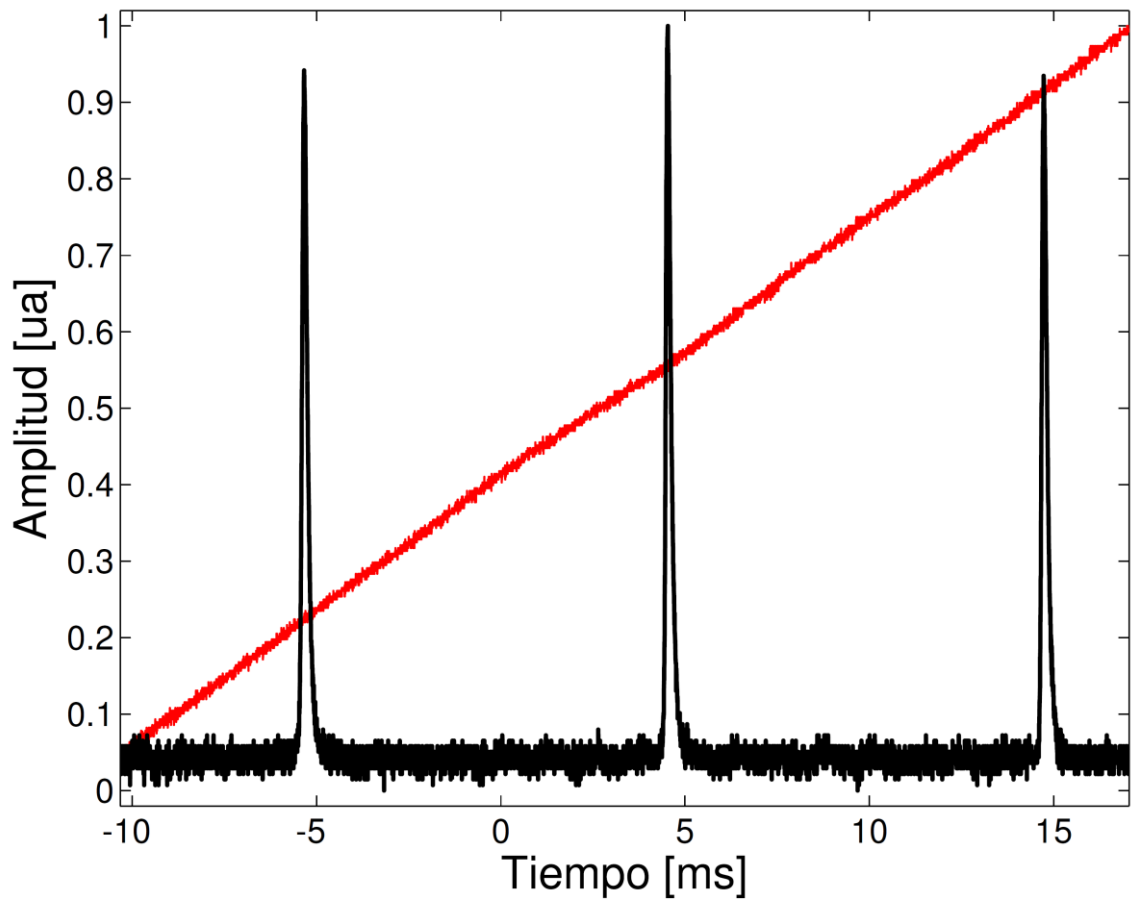
Para efectuar estas mediciones se cambia el diodo láser HL6714G (Hitachi) por el TOL9221M (Toshiba) que se tenía disponible, ya que según paper [14] con el diodo láser HL6714G no se pudo demostrar absorción.

Se muestra medición de modos usando piezoeléctrico de disco delgado



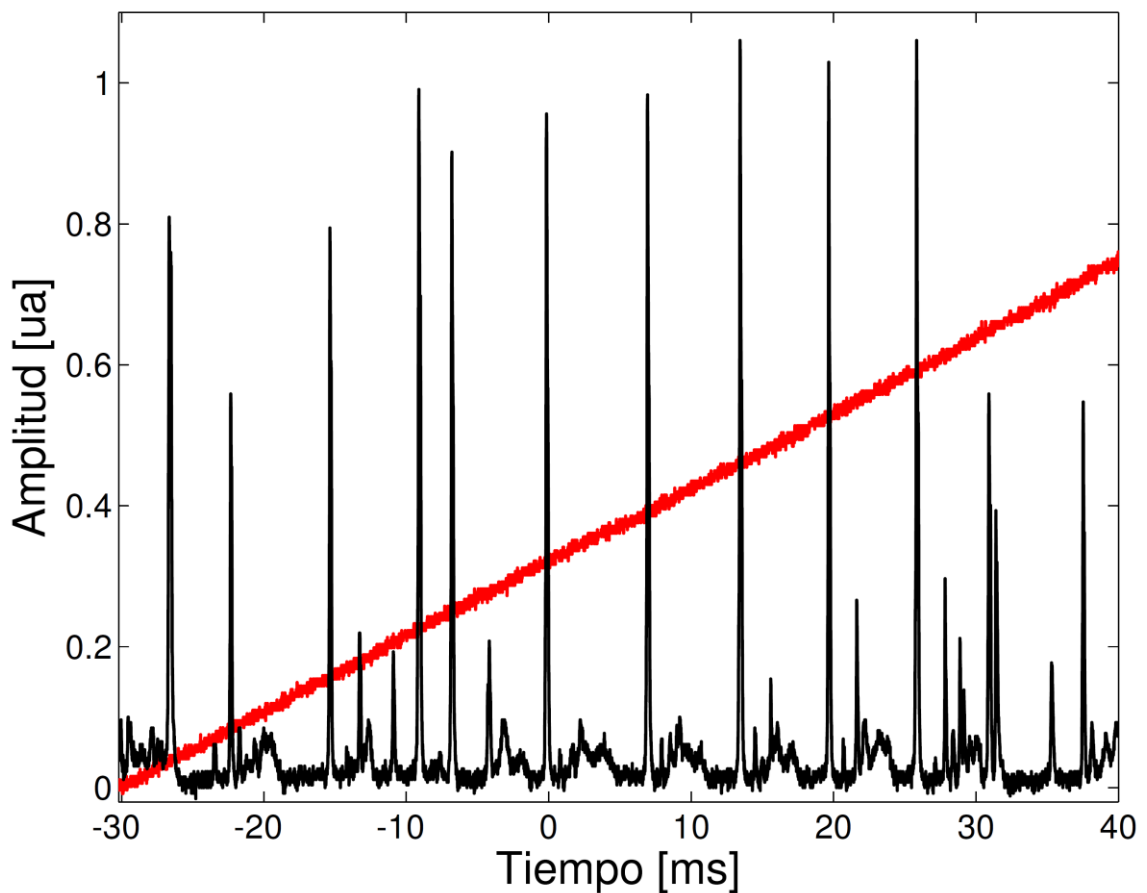
**Figura 4.11:** Modos del láser, usando diodo láser TOL9221M, 41,8 [mA] de corriente de operación del láser y 23,1 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del láser es una señal triangular positiva de 700 [V] peak to peak, 740 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 2 [GHz] (FPI Burleigh).

La medición del rango de barrido usando piezoeléctrico de disco grueso tipo C5500 (Channel Industries) es la siguiente:



**Figura 4.12:** Modos del láser, usando diodo láser TOL9221M, 42,2 [mA] de corriente de operación del láser y 22,6 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del láser es una señal triangular de 1000 [V] peak to peak, 20 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 2 [GHz] (FPI Burleigh).

Usando el piezoeléctrico Thorlabs puesto en montura KM100B (Thorlabs), la alimentación de este piezoeléctrico se hace directamente con fuente de poder MDT693A (Thorlabs) a diferencia de los casos anteriores, los resultados se muestran en la Fig. 4.13.

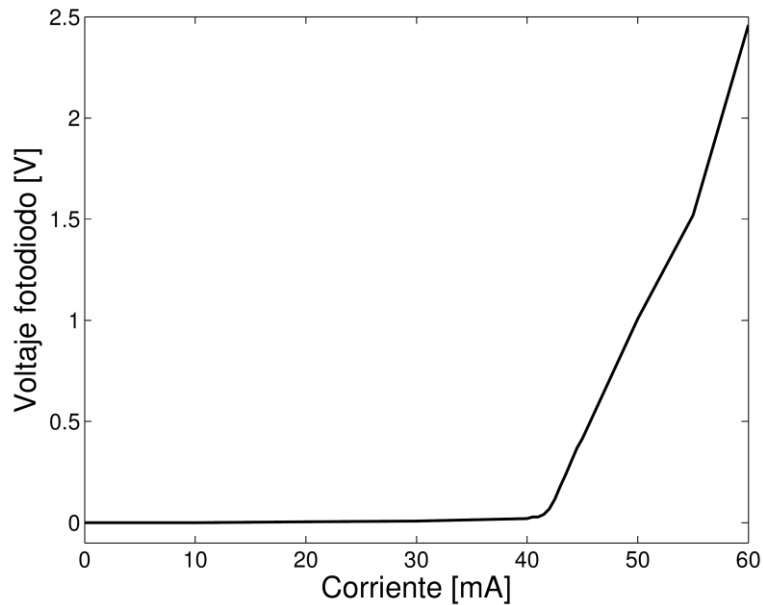


**Figura 4.13:** Modos del láser, usando diodo láser TOL9221M, 43 [mA] de corriente de operación del láser y 23,1 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del láser es una señal triangular positiva de 90,3 [V] peak to peak usando fuente de poder MDT693A (Thorlabs), 8 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 3 [GHz] (FPI construido).

#### 4.5 Calibración del láser usando celda de calibración

Se muestran a continuación las mediciones realizadas modulando la corriente del diodo láser TOL9221M, antes se encuentra la corriente y temperatura óptima para tener una longitud de onda de 670.784636 [nm], longitud en torno a la cual es posible encontrar una línea de absorción del litio.

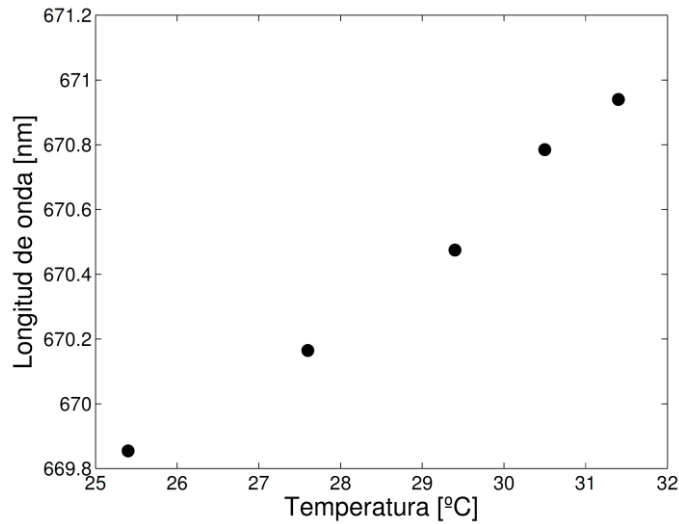
Primero se busca la corriente umbral para una temperatura de 22,8 [°C] usando un fotodiodo para estudiar la señal de salida del láser y su intensidad.



**Figura 4.14:** Medición de corriente v/s voltaje del fotodiodo, diodo láser a 22,8 [°C], usando fotodiodo DET10A y amplificador de señal a  $1 \times 10^5$ .

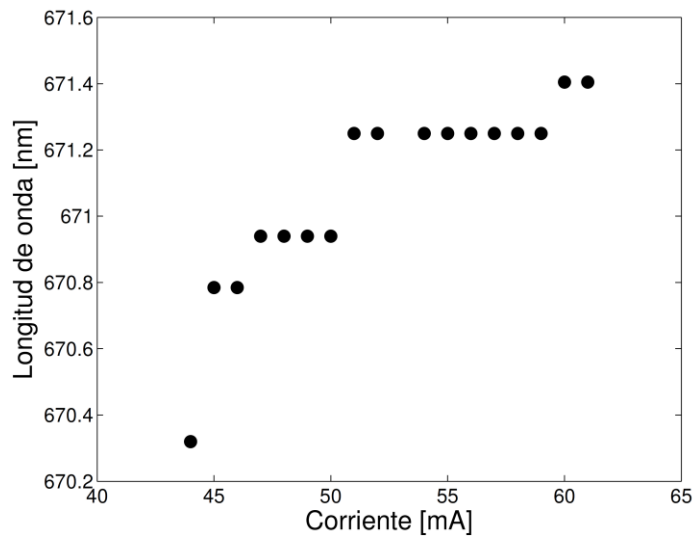
De la Fig 4.15 se encuentra que la corriente umbral a 22,8 [°C] es de 41,5 [mA], con esta información se busca una corriente superior y libre de saltos de modos para estudiar la variación de la longitud de onda con la temperatura, lo cual se hace observando la señal entregada por el fotodiodo ubicado a la salida del interferómetro, y se establece que una corriente de 45,6 [mA] satisface esta condición, con ello se procede a variar la temperatura para observar la longitud de onda.

Con el fin de centrarse en los 670,784636 [nm] se hace un estudio de forma rápida del rango de temperaturas que pueden estar cerca de aquel valor, encontrándose que los valores oscilan entre los 20,4 y 30,5 [°C], en donde se centra el estudio.



**Figura 4.15:** Gráfico de longitud de onda del láser v/s temperatura.

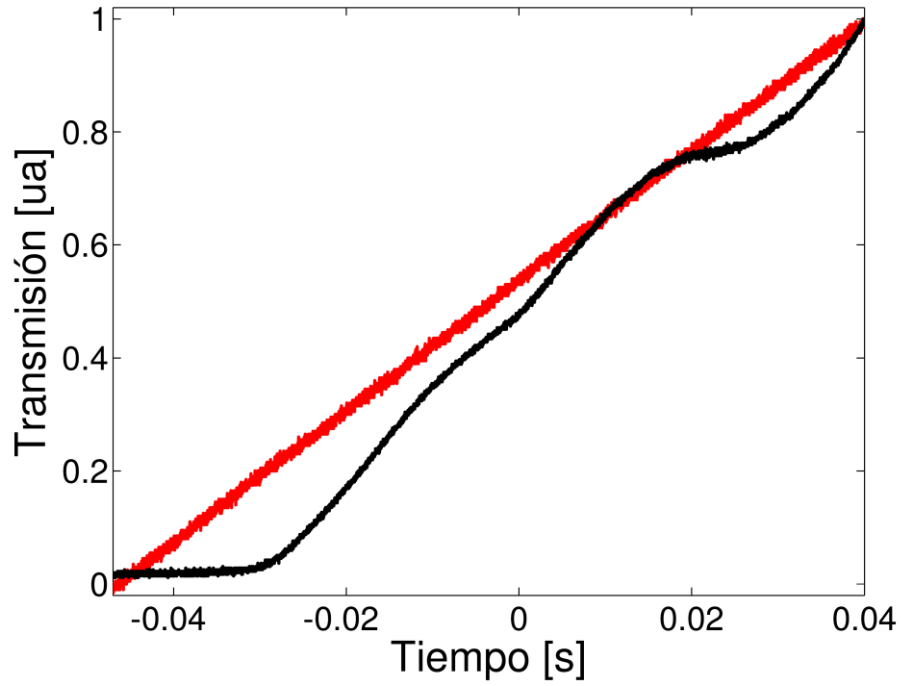
Con los datos se encuentra un valor óptimo para los 670,784636 [nm], que es 30,5 [°C], ahora se estudia la longitud de onda respecto de la corriente para saber el rango de corrientes que sirven para alcanzar dicha longitud de onda a una temperatura de 30,5 [°C]



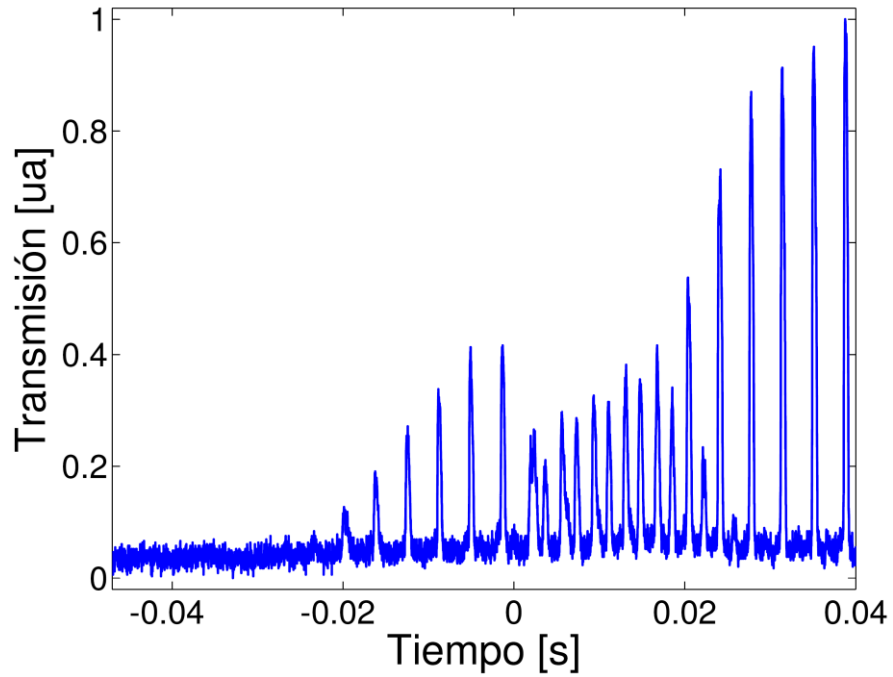
**Figura 4.16:** Gráfico de longitud de onda del láser v/s corriente para un temperatura de 30,5 [°C]

Según los datos de la Fig. 4.17 la corriente óptima está en el rango de 45 a 46 [mA]. Conseguidos los valores de corriente y temperatura óptimos para el funcionamiento del diodo láser se presentan las mediciones efectuadas con celda de calibración Heat Pipe a diferentes temperaturas.

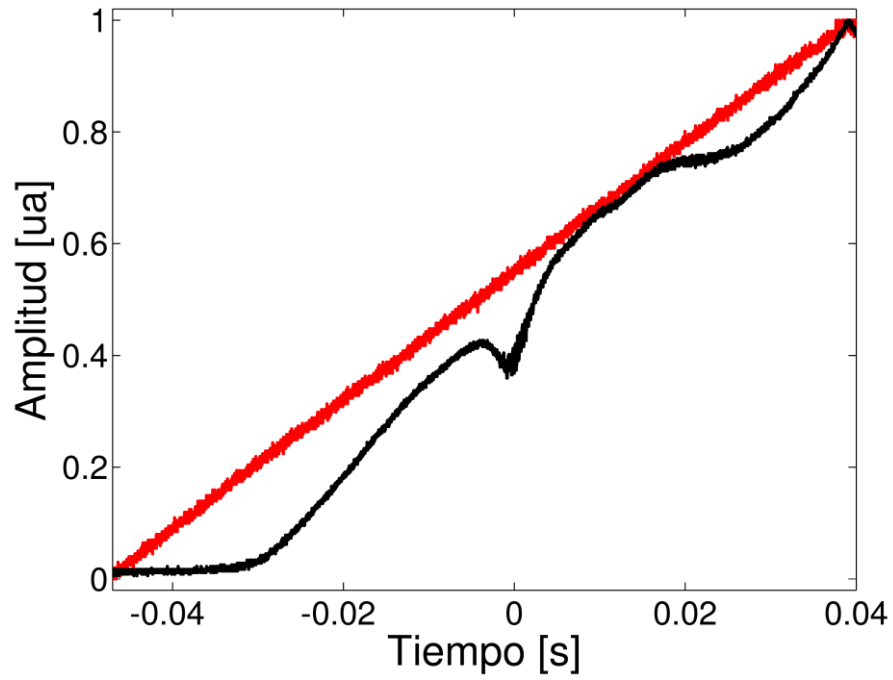




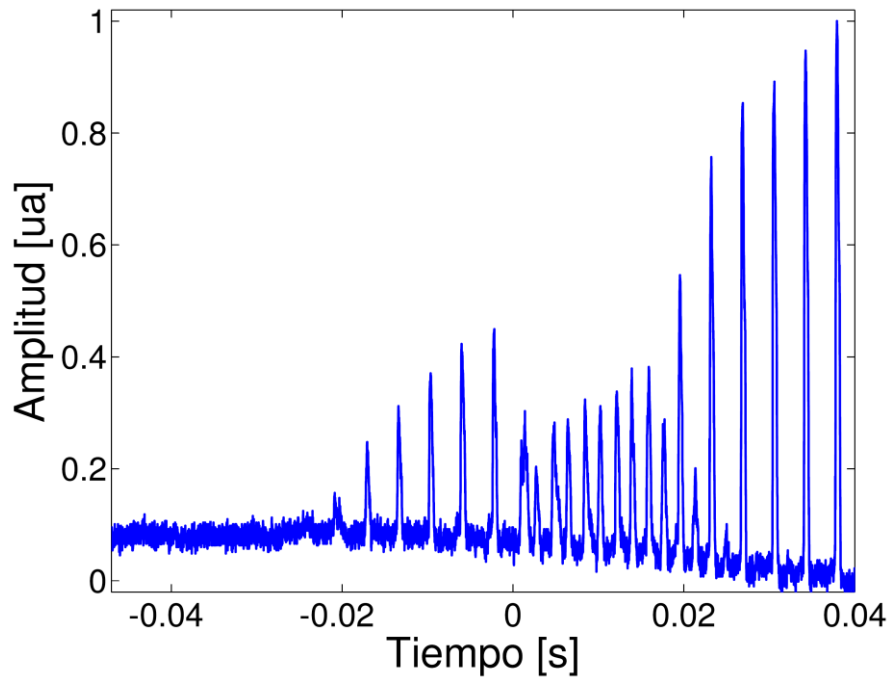
**Figura 4.17:** Rampa de modulación de corriente de 560 [mV] peak to peak, frecuencia de 4 [Hz] y señal del fotodiodo ubicado a la salida de la celda de absorción. Temperatura de la celda 302 [°C] y 3 [Torr] de helio (gas buffer).



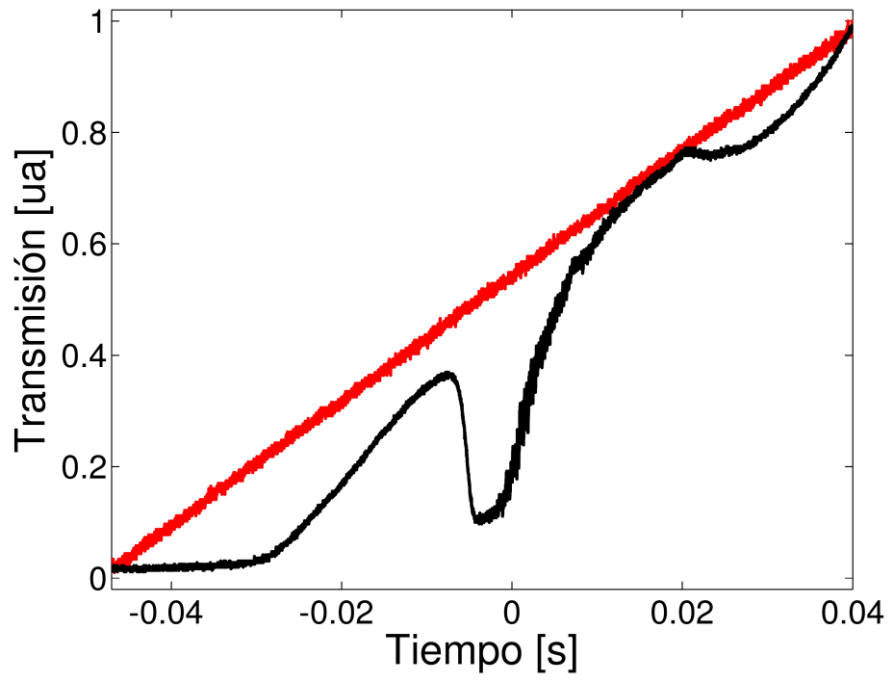
**Figura 4.18:** Modos del láser, usando Fabry-Perot confocal construido, FSR 3 [GHz].



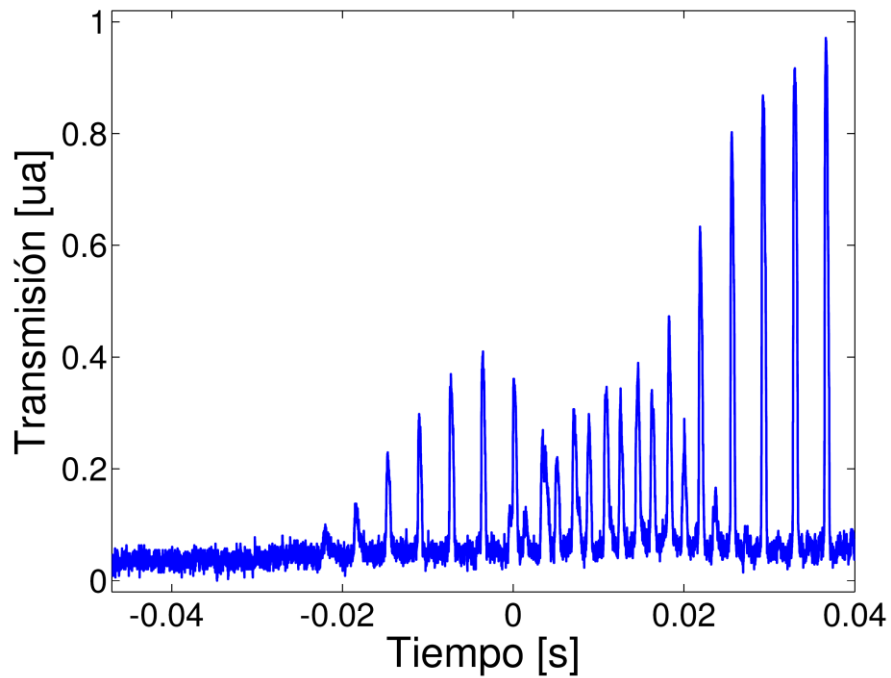
**Figura 4.19:** Rampa de modulación de corriente de 560 [mV] peak to peak, frecuencia de 4 [Hz] y señal del fotodiodo ubicado a la salida de la celda de absorción. Temperatura de la celda 382 [°C] y 3 [Torr] de helio (gas buffer).



**Figura 4.20:** Modos del láser, usando Fabry-Perot confocal construido, FSR 3 [GHz].



**Figura 4.21:** Rampa de modulación de corriente de 560 [mV] peak to peak, frecuencia de 4 [Hz] y señal del fotodiodo ubicado a la salida de la celda de absorción. Temperatura de la celda 540 [°C] y 3 [Torr] de helio (gas buffer).



**Figura 4.22:** Modos del láser, usando Fabry-Perot confocal construido, FSR 3 [GHz].

# Capítulo 5

## Análisis de resultados

### 5.1 Medición de la longitud de onda con rejilla de difracción

En las Fig. 4.2, 4.3 y 4.4 es posible apreciar que para diferentes condiciones de corriente de operación y temperatura del diodo láser, la longitud de onda varía en un rango cercano a los 671 [nm], con lo cual se comprueba que los parámetros de corriente de operación y temperatura del diodo láser afectan la longitud de onda de emisión del mismo y que se encuentra en torno a los 671 [nm], dada la baja resolución del espectrómetro no es posible hacer un ajuste más fino de la longitud de onda.

### 5.2 Medición de modos longitudinales del láser usando interferómetro Fabry-Perot confocal construido

Después de observar la Fig. 4.5 y que los modos no se ven simétricos cuando la distancia confocal está desplazada alrededor 0,6 [mm], en la Fig. 4.6 ya es posible apreciar la simetría de los peaks, que reflejan la cercanía a la distancia confocal. De acuerdo a la Ec. (2.15) y sabiendo que los espejos plano cóncavos del interferómetro construido tienen una reflectividad de 99,5%, la finesa teórica es de 626,75, mientras que el rango espectral libre es de 3 [GHz]. La finesa se calcula experimentalmente dividiendo el rango espectral libre por el ancho máximo a la mitad de la altura del peak, en donde se elige el más angosto, que en este caso es de 0,027 [GHz], con lo cual la finesa es de 111.

La Fig. 4.7 muestra la mejor alineación lograda, el ancho máximo a media altura para el peak más angosto es de 0,020 [GHz], obteniendo una finesa de 150.

En la Fig. 4.8 observamos un acercamiento del peak, donde está bien definido, pero que tiene una pequeña inclinación, implicando que la distancia confocal está próxima a conseguirse.

### 5.3 Medición de modos longitudinales del láser usando interferómetro Fabry-Perot confocal Toptica

De la Fig. 4.9 el valor del ancho máximo a media altura es 0,005 [GHz], el rango espectral libre para este interferómetro es de 1 [GHz], lo cual implica una finesa alcanzada de 200. Mientras que detalles técnicos del fabricante señalan que la finesa típica es de 1000 y la experimental mayor a 400, por lo cual no se ha alcanzado el rango experimental esperado, aunque al observar el acercamiento a uno de los peak en la Fig. 4.10 se tiene un peak muy bien definido y simétrico, en donde la distancia entre los espejos está próxima a la distancia confocal.

Al realizar mediciones con ambos interferómetro se observa que para los fines de analizar la estabilidad del láser el interferómetro construido se puede usar sin problema, ya que la finesa alcanzada es cercana a la obtenida con el interferómetro Toptica.

### 5.4 Medición del rango de barrido del láser usando diferentes piezoeléctricos

El piezoeléctrico de disco delgado (Fig. 4.12) no produjo un desplazamiento suficiente de la red de difracción y por ende de la cavidad extendida para encontrar un modo de oscilación, con el piezoeléctrico de disco grueso se observó una mejora, alcanzando un rango libre de saltos de modos de 4 [GHz], ya que el rango espectral libre del interferómetro Burleigh usado es de 2 [GHz]. Con el reemplazo por el piezoeléctrico Thorlabs, y usando el interferómetro Fabry-Perot confocal construido con un rango espectral libre de 3 [GHz], en donde se observa una zona de 15 [GHz] sin saltos de

modos al centro, pero en los extremos hay competencia de modos, lo que no permite que el barrido sea más amplio y suficiente para observar una línea de absorción.

## 5.5 Calibración del láser usando celda de calibración

En la Fig. 4.18 se observa cómo es la señal sin absorción, si bien la señal del fotodiodo no sigue completamente a la rampa de modulación se debe a que las ventanas de la celda actúan como una cavidad Fabry-Perot, lo que causa la aparición de la función Airy. En la Fig. 4.19 correspondiente a la señal de salida del interferómetro se aprecian dos zonas que están libres de saltos de modos, pero en la parte central se tiene la presencia de competencia de modos, lo que hace inestable el láser en aquel rango.

En la Fig. 4.20 se muestran resultados para una temperatura de la celda Heat Pipe de 382 [°C], en donde se observa una línea de absorción, la cual comienza en una zona libre de saltos de modos del láser (ver Fig. 4.21), pero que finaliza en el sector donde hay una competencia de modos, causando que la línea no se defina completamente.

En la Fig. 4.22 se observa que el sistema a una temperatura de 540 [°C] está saturado, ya que la línea de absorción observada tiene la misma pendiente que la rampa de modulación en la parte más baja de la línea.

Por lo tanto para una temperatura de 382 [°C] de la celda Heat Pipe se logra absorción en vapor litio, sin que haya saturación, lo que permite una calibración del láser construido.

## Capítulo 6

# Factibilidad de uso de láser de diodo sintonizable en aplicaciones industriales.

El uso de los láseres de diodo sintonizable tiene múltiples aplicaciones en la industria, dado que actualmente el rango de longitudes de onda para los cuales se dispone de diodos láser va desde los 0,4 a los 2 [ $\mu\text{m}$ ], lo cual permite detectar gases y moléculas tales como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{NH}_3$  para diagnóstico de combustión y monitoreo ambiental [9]. Algunos de los métodos más usados son la espectroscopía de absorción con láser de diodo sintonizable (TDLAS), del inglés Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy y espectroscopía de absorción de gases en medios dispersivos (GASMAS), del inglés Gas in Scattering Media Absorption Spectroscopy, teniendo ambas técnicas similitudes y en donde se usan tres módulos básicos: la fuente de luz, una muestra absorbente y el detector.

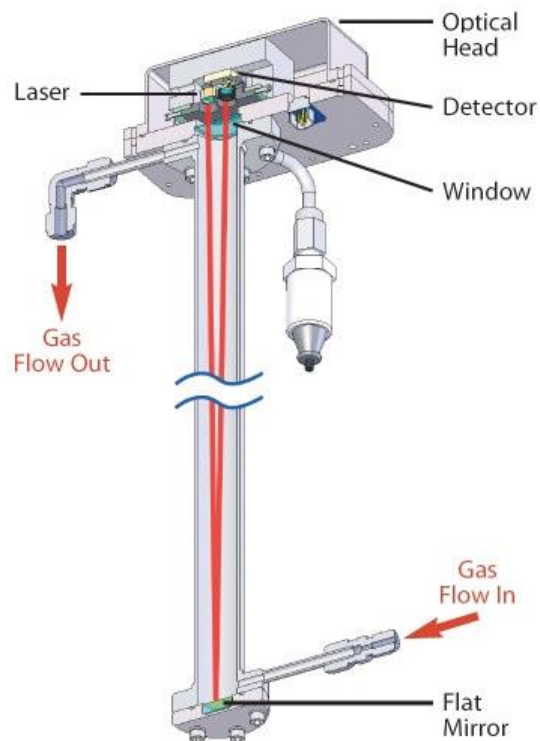
GASMAS es una técnica que permite realizar de manera no destructiva medidas *in situ* de gas libre que se encuentra en incrustaciones dentro de materiales dispersores, ya sean sólidos o líquidos. Esta técnica puede también dar información acerca de la presión, temperatura, estructura interna y características de difusión del material en investigación. GASMAS ha venido desarrollándose desde su introducción en 2001 y ha sido usada para investigaciones como: intercambio de gas en frutas, madera, rocas y para el diagnóstico de sinusitis en el ser humano [16].

TDLAS es una técnica para medir la concentración de ciertas especies como metano y vapor de agua en una mezcla gaseosa usando láseres de diodo sintonizable y

espectroscopía de absorción. La ventaja de esta técnica para la medición de concentración es la capacidad de alcanzar límites de detección muy bajos, del orden de partículas por billón (ppb) [17].

Una configuración básica para TDLAS consiste de un láser de diodo sintonizable, óptica para transmitir el haz, un medio absorbente y un detector. El láser se sintoniza en una línea de absorción característica del gas a estudiar, se hace pasar el haz a través de la sustancia y cuando se absorbe causa una disminución de la intensidad de la señal recibida por el fotodiodo. Esta información se utiliza para determinar la concentración del gas y otras propiedades.

Una de las aplicaciones reales es construir un montaje como el que se muestra en la Fig. 6.1, modelo obtenido de la empresa SpectraSensors y sirve para medición de vapor de agua, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno [18].



**Figura 6.1.** Sistema para medición de vapor de agua, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.



Con el tipo de montaje observado en la Fig 6.1 es posible obtener mediciones en unos pocos segundos, mientras que usando otras técnicas se debe esperar varias horas. Por ejemplo, cuando se instala un nuevo sensor de vapor de agua re-calibrado en un proceso en donde los niveles de humedad son de alrededor de una parte por millón (ppm) los usuarios deben esperar de 6 a 8 horas para que el sistema esté listo para medir, en cambio con un láser de diodo sintonizable toma unos pocos segundos [18].

A continuación se observa la cuantificación de los costos asociados a la construcción de un láser de diodo sintonizable e interferómetro Fabry-Perot confocal los cuales son elementos básicos para construir sistemas de medición como el observado en la Fig.6.1.

Materiales para láser de diodo	precio (\$)
Diodo láser HL6714G Hitachi 671 nm	37.672
Tubo de colimación LT230P-B Thorlabs	52.698
Lente esférico C230TME-B Thorlabs	41.304
Socket S8060 Thorlabs	3.323
Termistor th10k NTC Thermistors	1.852
Red de difracción NT43-742 Edmund	28.486
Montura para red KMS Thorlabs	15.904
Controlador de temperatura TED200 Thorlabs	507.044
Controlador de corriente LDC205B Thorlabs	451.022
Peltier CP1.4-127-045L-1-W6 Melcor	17.614
Piezas menores (diodos, tornillos)	23.738
Materiales de aluminio y acrílico	18.990
Total	1.199.647

**Tabla 6.1.** Detalle de piezas para construcción de láser de diodo sintonizable

El costo de los materiales para la construcción del láser de diodo sintonizable es de \$1.199.647, mientras que uno comercial DL100 TOPTICA vale \$7.278.071 con un rango de longitud de onda de 400 a 1600 [nm], que incluye un controlador de corriente DCC100/ 500 mA, un controlador de temperatura DTC100/ 30 W, unidad de escaneo

SC100, cables de conexión, controlador Proporcional Integral Derivativo PID100 y módulo Pound Drever PDD 100.

#### Interferómetro

Materiales para interferómetro	precio (\$)
2 espejos ROC=25mm 671nm VLOC	90.204
Piezoeléctrico cilíndrico hueco C5500 Channel I.	26.824
2 monturas cinemáticas KM100 Thorlabs	37.886
Duraluminio Thyssenkrupp	75.962
Piezas menores (BNC, tornillos)	23.738
Total	254.614

**Tabla 6.2.** Detalle de piezas para la construcción de interferómetro.

El costo de construir el interferómetro es de \$254.614, mientras que un interferómetro Fabry-Perot confocal comercial modelo FPI100 TOPTICA para un rango de longitudes de 600 a 900 [nm] con control de temperatura tiene un valor de \$2.350.062.

Los costos informados se obtienen del inventario del laboratorio de óptica láser.

La inclusión de los costos de la construcción del interferómetro se debe a que es un elemento de alta resolución que permite saber si el láser se encuentra en un modo longitudinal único para que se pueda hacer la medición sin problemas. Otro de los elementos necesarios es la celda de calibración, en este caso se necesita una celda de litio, que tiene un costo de \$2.373.800.

# Capítulo 7

## Discusión

Se calculan los modos del láser tipo *Littrow*, con el fin de analizar qué es lo que ocurre con esta configuración en nuestro caso para no obtener un rango de barrido del piezoeléctrico que desplaza la red difracción suficiente para lograr absorción en litio.

La intensidad de luz reflejada por una red de difracción es

$$I_R \cong RI_0 N^2 \frac{\sin^2(N\phi/2)}{(N\phi/2)^2} \quad (7.1)$$

donde  $R$  es la reflectividad de la red,  $I_0$  es la intensidad total incidente,  $N$  es el número de líneas iluminadas,  $\phi$  es la fase definida por

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2d \sin(\alpha) \quad (7.2)$$

con  $\lambda$  la longitud de onda del láser,  $d$  el espaciado de la red y  $\alpha$  el ángulo de incidencia. En la configuración *Littrow* el primer orden reflejado se devuelve sobre el rayo incidente y

$$\lambda = 2d \sin(\alpha) \quad (7.3)$$

La intensidad reflejada por una cavidad de dos espejos planos paralelos es

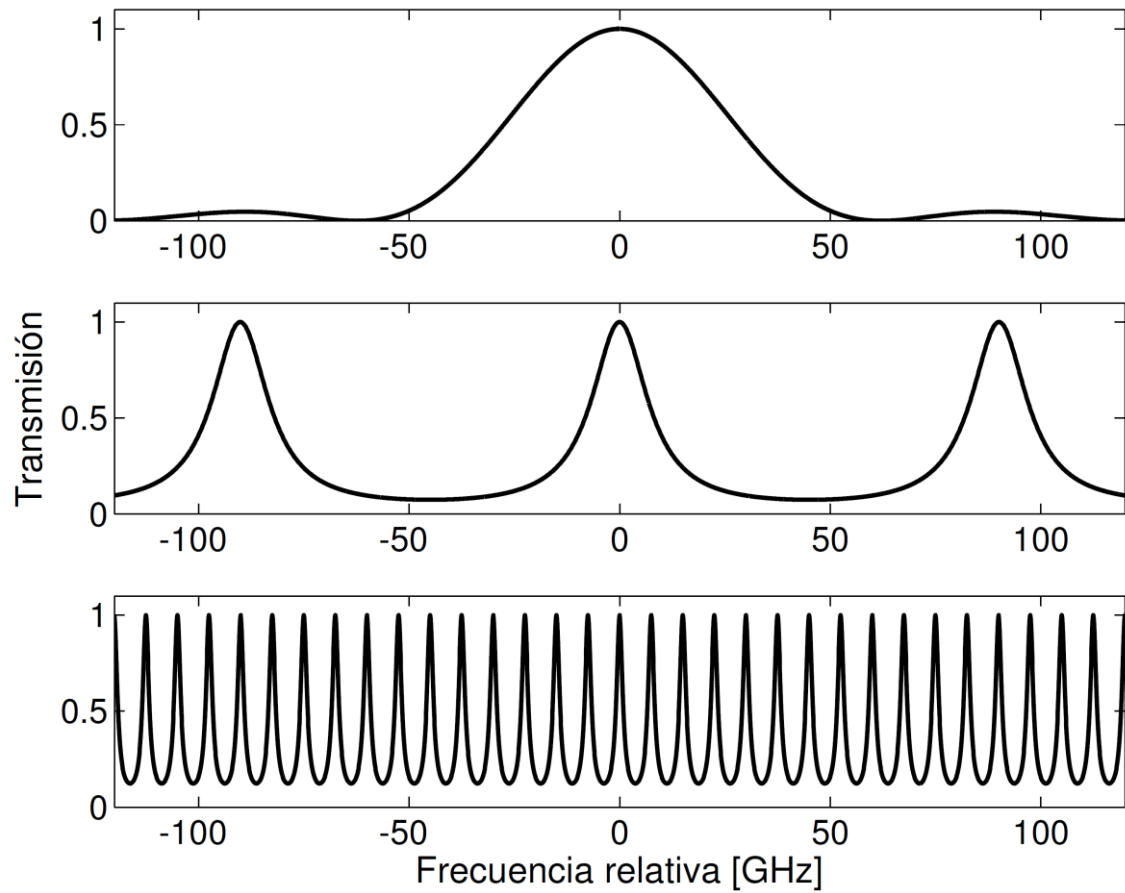
$$I_T = I_0 \frac{(1-R_1)(1-R_2)}{1+R_1R_2-2\sqrt{R_1R_2}\cos\phi} \quad (7.4)$$

donde  $R_1$  y  $R_2$  son las reflectividades de los espejos en la cavidad, y  $\phi$  es la diferencia de fase.

La reflectividad para incidencia normal de una superficie que separa dos medios con índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$  es

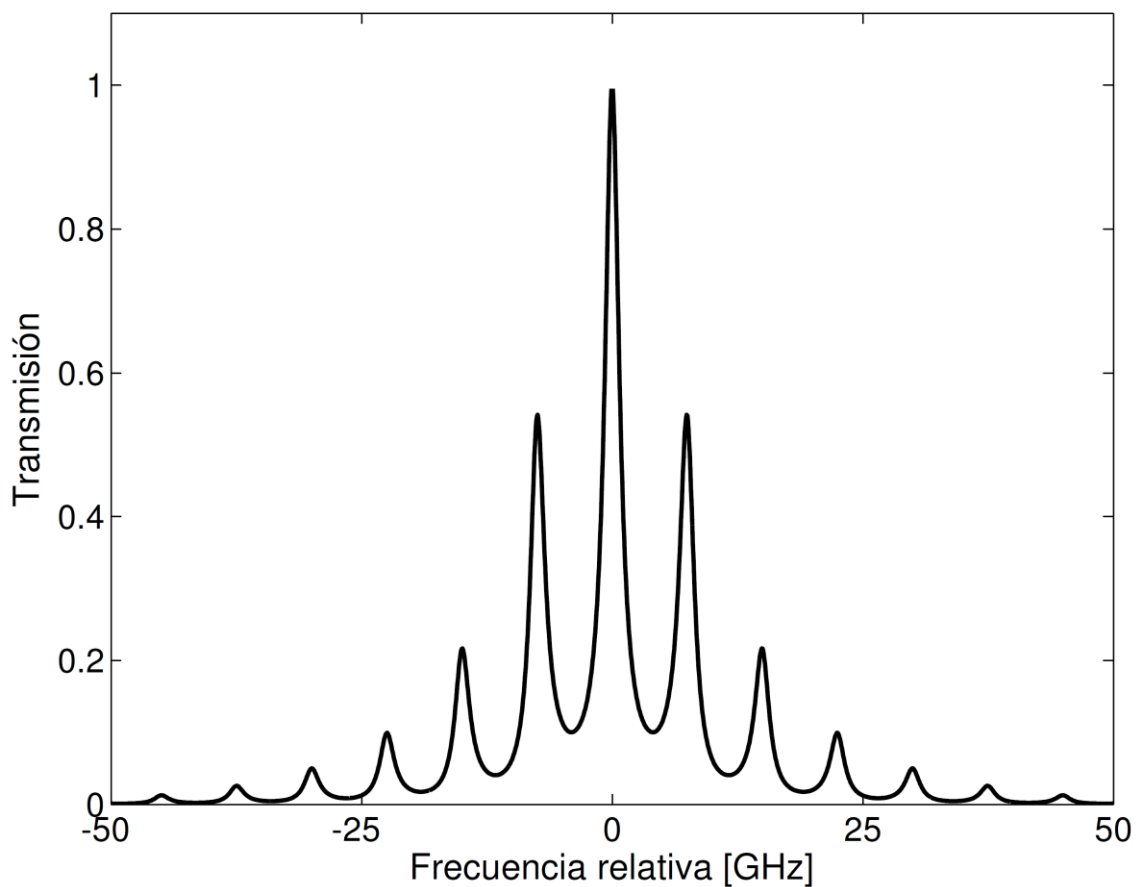
$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (7.5)$$

La Fig. 7.1 muestra la transmisión de la red, de la cavidad interna y de la cavidad externa donde se considera una red de difracción (Edmund, Modelo NT43-752) de 12,7 x 12,7 x 6mm y 1200 [líneas/mm], un diodo láser (Toshiba, Modelo TOLD9221M) de 670 [nm] y largo de la cavidad interna 450 [ $\mu$ m] que es la longitud del medio activo del láser. El largo de la cavidad externa del diodo láser es la distancia entre el diodo y la red igual a 2 [cm]. El número de líneas iluminadas es  $N = 7200$  (6 [mm] x 1200 [líneas/mm]) y el ángulo de la red en configuración *Littrow* para 1200 [líneas/mm] es 23,7 °. En la cavidad interna se tiene que  $R_1 = 0,995$  que corresponde al espejo de atrás de la cavidad interna y  $R_2 = 0,33$  que se calcula de acuerdo a la Ec. 7.5, ya que el índice de refracción del medio láser es de 3,7 y para el aire usamos 1, mientras que para la cavidad externa se tiene  $R_1 = 0,33$  ya que es la misma ventana del diodo láser y  $R_2 = 0,50$  que se obtiene de las especificaciones del fabricante de la red para 670 [nm].



**Figura 7.1.** Transmisión de cada uno de los elementos presentes en el diodo láser de cavidad externa en función de la frecuencia incidente. En la parte superior la transmisión de la red de difracción de 1200 [líneas/mm], en el centro la transmisión de la cavidad interna y en la parte baja la transmisión de la cavidad externa.

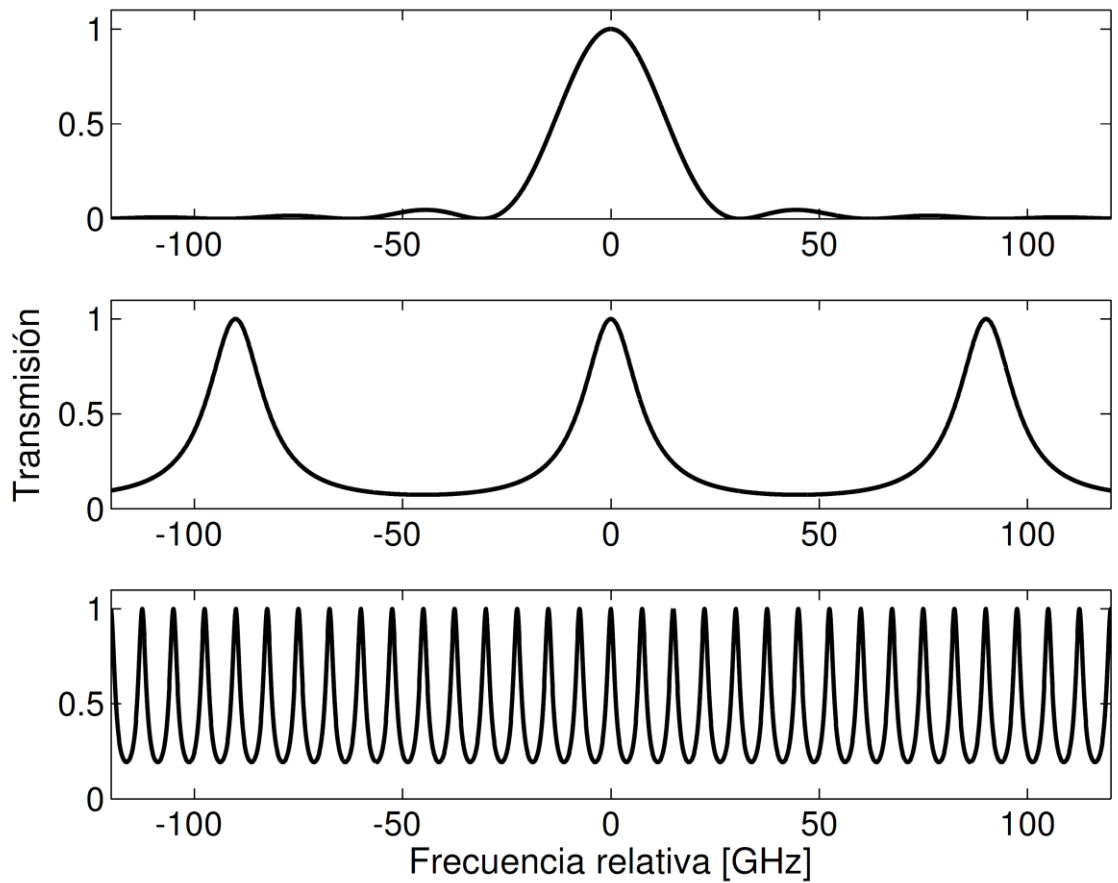
La Fig. 7.2 muestra la transmisión total del láser, formado por el diodo láser TOLD9221M, la cavidad interna de 450 [ $\mu\text{m}$ ] y la cavidad externa de 2 [cm].



**Figura 7.2.** Trasmisión total de láser, que es el producto de la transmisión de la red de difracción de 1200 [líneas/mm], la trasmisión de la cavidad interna de 450 [μm] del diodo láser y la trasmisión de la cavidad externa.

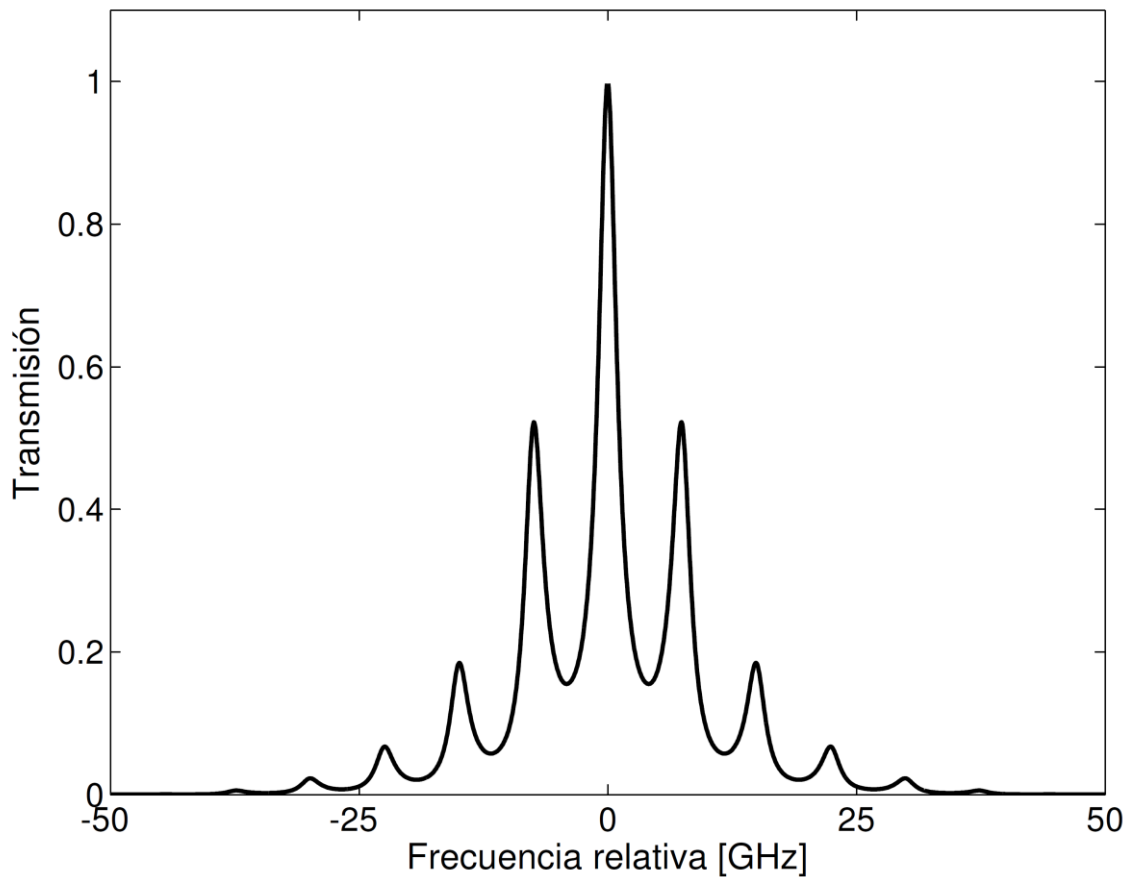
La Fig. 7.3 muestra la trasmisión de la red, de la cavidad interna y de la cavidad externa donde se considera una red de difracción (Edmund, Modelo NT-43777) de 12,7 x 12,7 x 6 [mm] y 2400 [líneas/mm], un diodo láser (Toshiba, Modelo TOLD9221M) de 670 [nm] y largo de la cavidad interna 450 [μm] que es la longitud del medio activo del láser. El largo de la cavidad externa del diodo láser es la distancia entre el diodo y la red igual a 2 [cm]. El número de líneas iluminadas es  $N = 14400$  (6 [mm] x 2400 [líneas/mm]) y el ángulo de la red para 2400 [líneas/mm] es 53,5°. En la cavidad interna se tiene que  $R_1 = 0,995$  que corresponde al espejo de atrás de la cavidad interna y  $R_2 = 0,33$  que se calcula de acuerdo a la Ec. 7.5, ya que el índice de refracción del medio láser

es de 3,7 y para el aire usamos 1, mientras que para la cavidad externa se tiene  $R_1 = 0,33$  ya que es la misma ventana del diodo láser y  $R_2 = 0,46$  que se obtiene de las especificaciones del fabricante de la red para 670 [nm].



**Figura 7.3.** Transmisión de cada uno de los elementos presentes en el diodo láser de cavidad externa en función de la frecuencia incidente. En la parte superior la transmisión de la red de difracción, en el centro la transmisión de la cavidad interna y en la parte baja la transmisión de la cavidad externa.

La Fig. 7.4 muestra la transmisión total del láser, formado por el diodo láser TOLD9221M, la cavidad interna de 450 [ $\mu\text{m}$ ] y la cavidad externa de 2 [cm].



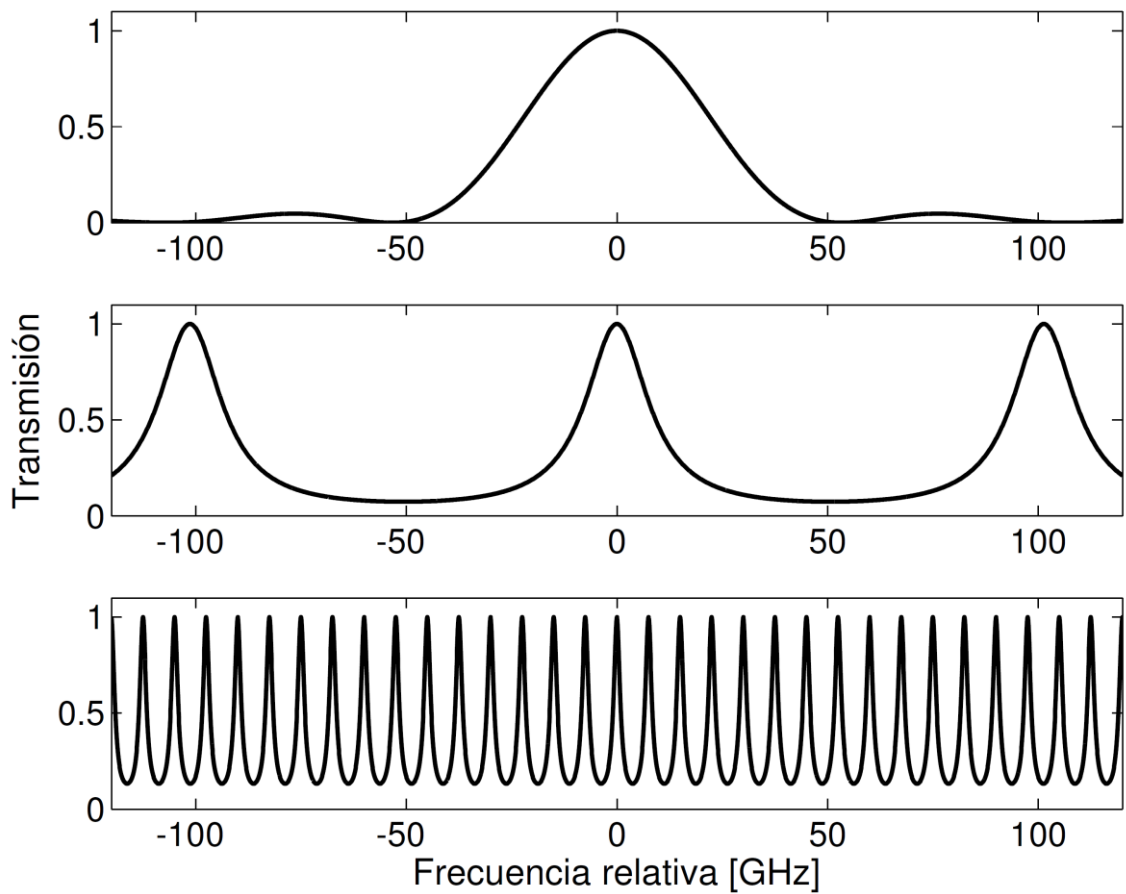
**Figura 7.4.** Trasmisión total de láser, que es el producto de la transmisión de la red de difracción de 2400 [líneas/mm], la trasmisión de la cavidad interna de 450 [μm] del diodo láser y la trasmisión de la cavidad externa.

Si reemplazamos el diodo láser de 670 [nm] por uno de 780 [nm], las condiciones son una cavidad interna de [400] μm y la cavidad externa de 2 [cm].

La Fig. 7.5 muestra la trasmisión de la red, de la cavidad interna y de la cavidad externa donde se considera una red de difracción (Edmund, Modelo NT43-752) de 12,7 x 12,7 x 6 [mm] y 1200 [líneas/mm], un diodo láser (Hitachi, modelo HL7851G) de 785 [nm] y largo de la cavidad interna 400 [μm] que es la longitud del medio activo del láser. El largo de la cavidad externa del diodo láser es la distancia entre el diodo y la red igual a 2 [cm]. El número de líneas iluminadas es  $N = 7200$  (6 [mm] x 1200 [líneas/mm]) y el ángulo de la red para 1200 [líneas/mm] es 27,9 °. En la cavidad interna se tiene que  $R_1 =$

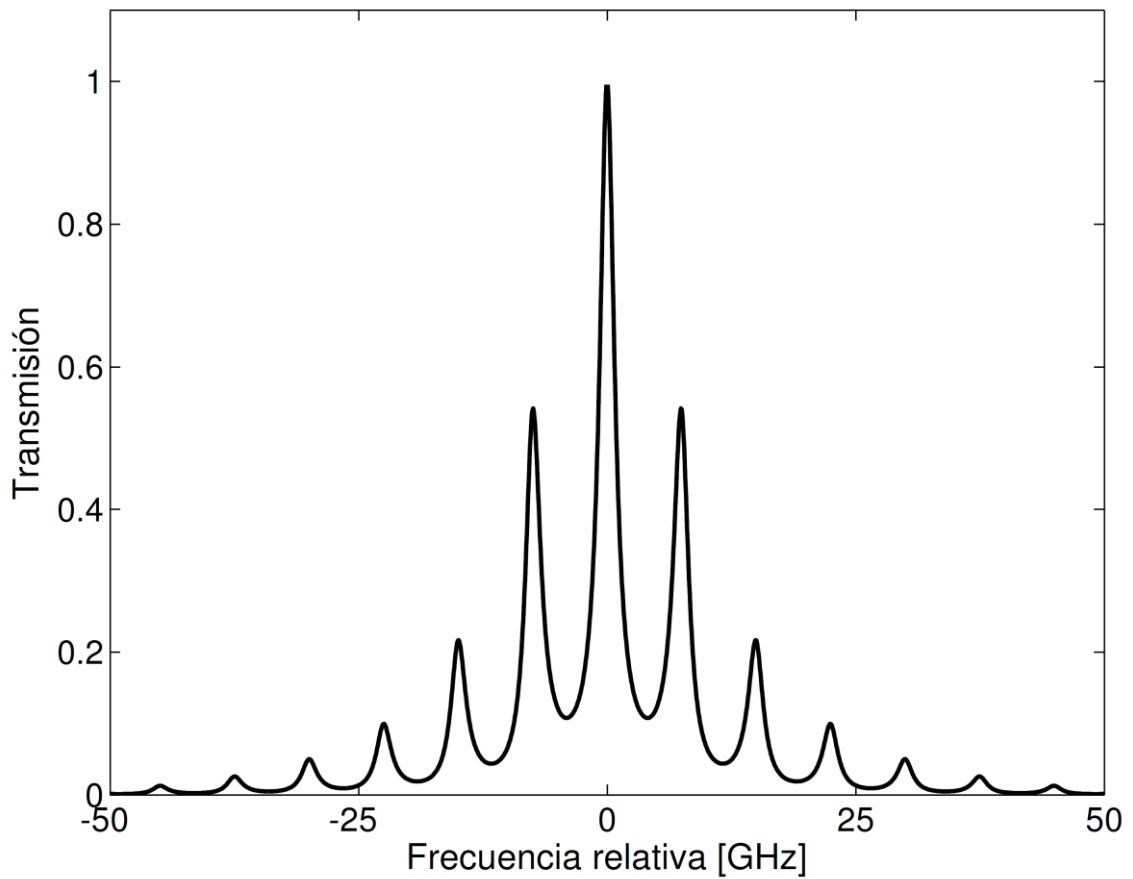


0,995 que corresponde al espejo de atrás de la cavidad interna y  $R_2 = 0,33$  que se calcula de acuerdo a la Ec. 7.5, ya que el índice de refracción del medio láser es de 3,7 y para el aire usamos 1, mientras que para la cavidad externa se tiene  $R_1 = 0,33$  ya que es la misma ventana del diodo láser y  $R_2 = 0,66$  que se obtiene de las especificaciones del fabricante de la red para 780 [nm].



**Figura 7.5.** Transmisión de cada uno de los elementos presentes en el diodo láser de cavidad externa en función de la frecuencia incidente. En la parte superior la transmisión de la red de difracción, en el centro la transmisión de la cavidad interna y en la parte baja la transmisión de la cavidad externa.

La Fig. 7.6 muestra la transmisión total del láser, formado por el diodo láser HL7851G, la cavidad interna de 400 [ $\mu\text{m}$ ] y la cavidad externa de 2 [cm].



**Figura 7.6.** Trasmisión total de láser, que es el producto de la transmisión de la red de difracción de 1200 [líneas/mm], la trasmisión de la cavidad interna de 400 [μm] del diodo láser y la trasmisión de la cavidad externa.

Al usar una red de difracción de 1200 [líneas/mm] y una longitud de onda de 670 [nm] se obtiene una transmisión en la red que tiene un ancho a media altura de 51 [GHz] aproximadamente, mientras que al usar una red 2400 [líneas/mm] el ancho a media altura es de 27,5 [GHz], que corresponde a la mitad del ancho usando una red de 1200 [líneas/mm], por lo tanto al usar una red de más [líneas/mm] facilita la sintonización del láser de cavidad extendida, además al disminuir este ancho también se produce una baja de los peaks que acompañan al máximo principal, reduciéndose la transmisión de 0,5417 a 0,4965, que corresponde a un 4,52 %. Resultados similares se obtienen cuando se usa

una longitud de onda de 780 [nm], en donde el ancho a media altura disminuye de 47,3 GHz a 23,7 GHz, al reemplazar la red de 1200 [líneas/mm] por una de 2400 [líneas/mm], en donde el peak secundario también disminuye su transmisión de 0,5419 a 0,4964 correspondiendo a un 4,65 %, lo que facilita la presencia un modo en la cavidad. La diferencia encontrada para luz láser de 670 [nm] y 780 [nm] es baja, pero hay que considerar que en rubidio el barrido para conseguir todas las líneas de absorción es 3 veces menor que para obtener las líneas del litio, en donde se deben tener 30 [GHz] sin saltos de modos.

Con estos cálculos es posible visualizar cómo afecta el número de líneas de la red de difracción en la sintonización del láser, pero está la otra parte que es donde se hace el desplazamiento de la red por medio de un transductor piezoeléctrico, lo cual permite variar tanto el ángulo de incidencia como también la longitud de la cavidad externa.

Se tiene que al desplazar la cavidad usando el piezoeléctrico no sólo hay una variación en la longitud de la cavidad, sino también del ángulo de incidencia del haz láser en la red de difracción, es por ello que estudiamos cómo afecta este desplazamiento a la longitud de la cavidad y también al desplazamiento del ángulo.

Se calcula ahora el aporte del movimiento axial y angular para barrido en frecuencia dentro de la cavidad Littrow al desplazar la red usando un piezoeléctrico, la longitud de cavidad extendida de 2 [cm]. El rango espectral libre para una cavidad del tipo Fabry-Perot de largo 2 [cm] es

$$FSR = \frac{c}{2L} = \frac{3 \cdot 10^8 \left[ \frac{m}{s} \right]}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} [m]} = 7,5 [GHz] \quad (7.6)$$

Con el largo de la cavidad, y con una longitud de onda en este caso de 670 [nm] es posible calcular las N medias longitudes de onda contenidas dentro de la cavidad, según la Ec. 7.7

$$N = \frac{L}{\frac{\lambda}{2}} = \frac{2 \cdot 10^{-2} [\text{m}]}{\frac{0,67 \cdot 10^{-6}}{2} [\text{m}]} = 6 \cdot 10^4 \quad (7.7)$$

Si hace un barrido de la cavidad extendida entre la longitud L inicial hasta el límite de media longitud de onda, sin llegar a esta cantidad, se produce una variación de la longitud de onda en aquel tramo, encontrándose una variación máxima de la longitud de onda  $\Delta\lambda_{\text{MÁX}}$  para no tener un saltos de modos.

$$\Delta\lambda_{\text{MÁX}} = \frac{\lambda}{N} = \frac{670 \cdot 10^{-9} [\text{m}]}{6 \cdot 10^4} = 0,005 \cdot 10^{-9} [\text{m}] = 5 [\text{pm}] \quad (7.8)$$

Calculamos ahora el desplazamiento en frecuencia desde 670 [nm] para el  $\Delta\lambda_{\text{MÁX}}$  encontrado en Ec. 7.8

$$\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 [\text{ms}^{-1}]}{(670 \cdot 10^{-9} [\text{m}])^2} \cdot 5 \cdot 10^{-12} [\text{m}] = 3,3 [\text{GHz}] \quad (7.9)$$

La Ec.7.9 muestra el barrido máximo en frecuencia logrado dentro de una cavidad de longitud 2 [cm] para un láser de cavidad extendida centrado en torno a los 670 [nm]. Para calcular la variación en frecuencia o longitud de onda debido al cambio angular de la red de difracción en la cavidad Littrow usamos la Ec. 7.10

$$\lambda = 2d \sin(\alpha) \quad (7.10)$$

Con  $d$  el espaciado de la red, de la Ec. 7.11 es posible 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

$$\Delta\lambda=2d\cos(\alpha)\cdot\Delta\theta=2\cdot\frac{10^{-3}[\text{m}]}{1200}\cdot\cos(23)\cdot\frac{670}{2}\cdot\frac{10^{-9}[\text{m}]}{2\cdot 10^{-2}[\text{m}]}=25\cdot 10^{-12}[\text{m}] \quad (7.11)$$

A partir de la Ec. 7.11 se calcula la variación en frecuencia debido a la variación angular de la red de difracción cuando gira respecto a un pivote geométrico puntual.

$$\Delta\nu = 18[\text{GHz}] \quad (7.12)$$

A través de los cálculos se encuentra que la componente angular causada por el desplazamiento de la red tiene un mayor efecto que el desplazamiento axial de la misma al momento de hacer el barrido con el piezoeléctrico.

Teniendo la información del aporte de una red de difracción de 1200 y otra de 2400 [líneas/mm], además del desplazamiento en frecuencia correspondiente al desplazamiento axial y angular de la red de difracción se observa que el mayor aporte lo hace el desplazamiento angular, pero en este caso no hubo un efecto de tener un rango de al menos 30 [GHz] libre de saltos de modos para lograr absorción en litio porque el punto pivote propuesto, debido al diseño seguido [3] no fue posible alcanzarlo, por lo cual una de las posibilidades es modificar el diseño y ajustarlo para cumplir con la condición del punto pivote o bien usar la configuración Littman-Metcalf, ambas situaciones son complejas por lo que se decide una tercera opción, lo cual es modular el diodo láser con corriente.

Se consiguen parámetros de corriente y temperatura que permiten tener una longitud de onda en torno a los 671,78 [nm] y luego efectuar la modulación en corriente del láser,

con lo cual se alcanza un rango de barrido más amplio que usando un piezoeléctrico, aunque en un sector se tiene una competencia de modos, es posible observar una línea de absorción y que al momento de ocurrir la competencia de modos la línea pierde definición pero se aprecia de todas formas, se verificó con una medición a 540 [°C] de temperatura de la celda Heat Pipe que efectivamente se estaba demostrando absorción, ya que a tal temperatura se saturó el espectro, mientras que a 302 [°C] no se observó la línea, por que aún no existía vapor de litio.

# Capítulo 8

## Conclusión

Se diseñó y construyó un láser sintonizable visible usando un diodo láser con una longitud de onda central de 670 [nm] en configuración Littrow o cavidad extendida. El láser fue estabilizado en temperatura y corriente. Se caracterizó la longitud de onda del láser por medio de un espectrómetro de rejilla de baja resolución. Se determinó que el rango de variación de longitud de onda es del orden de 10 [nm]. Se construyó un interferómetro Fabry-Perot confocal de barrido con espejos con recubrimiento diseñado para 671 [nm]. Se estudiaron los modos del láser y se ajustó el láser para obtener un modo longitudinal único. El diodo láser de cavidad libre modulado en corriente amplía el rango de barrido y permite barrer las frecuencias del láser. Se demuestra la absorción en vapor de litio con el láser de cavidad libre. Se observa por lo menos una de las tres líneas de absorción de este elemento en torno a los 671 [nm] y con ello se obtiene la calibración del láser usando la celda Heat Pipe como una celda de calibración.

El diseño compacto y estable alcanzado con el láser e interferómetro construidos los hace atractivos para su uso en aplicaciones industriales, ya que permite su traslado y así medir *in-situ* un gas de interés. Para esto se debe calibrar el láser con una celda de calibración, conociendo previamente la frecuencia en torno a la que se tiene que barrer el láser.

Lo anterior permite la aplicación de esta instrumentación y técnicas, desarrolladas en este trabajo, en medición de contaminantes atmosféricos, gases y moléculas como por ejemplo CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> y NH<sub>3</sub>.

Este trabajo permitió aprender las técnicas para desarrollar el método de detección de átomos y moléculas con un láser sintonizable.

# Capítulo 9

## Referencias

- [1] C. Wieman and L. Holberg, “Using diode lasers for atomic physics”, *Rev. Sci. Inst.* **62**, 1-20 (1991).
- [2] L. Ricci et al., “A compact grating-stabilized diode laser system for atomic physics”, *Optics Communications* **117**, 541-549 (1995).
- [3] 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).
- [4] Boyd, Bliss, and Libbrecht, “Teaching physics with 670-nm diode lasers-experiments with Fabry-Perot cavities”, *Am. J. Phys.* **64**, 1109-1116 (1996).
- [5] Sacher Lasertechnik Group: Technical Documentation <http://data.sacher-laser.com/techdocs/PoDL.pdf>.
- [6] Laboratorio avanzado de física atómica y óptica no lineal, laboratorio n° 1, <http://fisica.usach.cl/~iolivare/lab1diodolaser.pdf>
- [7] Genty et. al., “Analysis of the Linewidth of a Grating-Fedback GaAlAs Laser”, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **36** n° 10, 1193-1198 (2000)
- [8] F. J. Duarte “Tunable Laser Handbook”, Zorabedian 349-435 (1995)
- [9] C. Ye “Tunable External Cavity Diode Lasers”, First Edition (2004).
- [10] McNicholl and Metcalf, “Synchronous cavity mode and feedback wavelength scanning in dye laser oscillators with gratings”, *Applied Optics* **24** n° 17, 2757-2761 (1985).



- [11] J. Kondziela, Product Line Manager, EXFO Burleigh Products Group, “Accurately Measure Laser Spectral Characteristics”, Wave Review (2003), <http://www.exfo.com/en/Library/WaveReview/February2003/WRarticle3.asp>
- [12] W. Demtroder, “Laser Spectroscopy Basic Concepts and Instrumentation”, Third Edition, 131-134.
- [13] FPI 100, “Fabry-Perot Interferometer Manual”, TOPTICA Photonics AG.
- [14] Adra V. Carr, Yancey H. Sechrest, Scott R. Waitukaitis, John D. Perreault, Vincent P.A. Lonij and Alexander D. Cronin, “Cover slip external cavity diode laser”, <http://arxiv.org/abs/0708.0014v2>
- [15] Gibson Peter Nyamuda, Thesis “Design an development of an external cavity diode laser for laser cooling and spectroscopy applications”, Stellenbosh University (2006)
- [16] Yolanda Angulo, César Costa, Tesis “Estudio de la medición relativa y absoluta de la concentración de oxígeno en medios dispersivos con la técnica GASMAS y aplicaciones”, Escuela Politécnica Nacional (2007).
- [17] Cassidy and Reid, “Atmospheric pressure monitoring of trace gases using tunable diode lasers”, Applied Optics **21** n° 7, 1185-1190 (1982).
- [18] Paul Stockwell, IMA Limited, “Tunable Diode Laser (TDL) systems for trace gas analysis”, [http://www.ima.co.uk/technical/tld\\_gas\\_analysis.pdf](http://www.ima.co.uk/technical/tld_gas_analysis.pdf)

# Índice de Figuras

## Capítulo 2: Teoría

<b>Figura 2.1:</b> Elementos básicos de un láser.....	4
<b>Figura 2.2:</b> Representación esquemática del perfil de ganancia y los modos longitudinales que se desplazan a medida que cambia la temperatura, adaptado de [15].....	6
<b>Figura 2.3:</b> Vista esquemática de un chip de diodo láser.....	7
<b>Figura 2.4:</b> Cavity interna de un láser modificada $\Delta L$ , debido a pequeñas variaciones mecánicas o de temperatura. Cada línea representa frecuencias cercanas entre sí.....	9
<b>Figura 2.5:</b> Cavity extendida, se observa que la separación entre las ondas con frecuencias distintas aumenta al alejarse de la cavity $\Delta L < \Delta L_{\text{ext}}$ .....	9
<b>Figura 2.6:</b> Esquema de diodo láser en configuración Littrow.....	10
<b>Figura 2.7:</b> Red de difracción, condición de interferencia constructiva.....	11
<b>Figura 2.8:</b> Red de difracción, condición para configuración Littrow.....	12
<b>Figura 2.9:</b> Configuración Littrow y punto pivote.....	13
<b>Figura 2.10:</b> Configuración Littman-Metcalf y punto pivote.....	14
<b>Figura 2.11:</b> Contribución de los diferentes elementos a la sintonización del láser, de arriba hacia abajo, ganancia del medio, retroalimentación de la red de difracción, cavity interna y cavity externa.....	15
<b>Figura 2.12:</b> Onda estacionaria dentro de una cavity Fabry-Perot de largo $L$ .....	16
<b>Figura 2.13:</b> Interferencia de haces múltiples para dos superficies parcialmente reflectantes, separadas por una distancia $L$ .....	17
<b>Figura 2.14:</b> Función de Airy para reflectividades de 0,5 y 0,9, en donde se observa cómo cambia $\Delta\nu_{FWHM}$ y con ello la finesa.....	19
<b>Figura 2.15:</b> Interferómetro Fabry-Perot confocal.....	19
<b>Figura 2.16:</b> Diagrama de una línea de absorción.....	21

### Capítulo 3: Experimento

<b>Figura 3.1:</b> Placa base del láser, construida de duraluminio y que actúa como sumidero para el aislamiento térmico del sistema, que es controlado por un Peltier, medidas en [mm].....	23
<b>Figura 3.2:</b> Cilindro de PVC que permite aislamiento térmico entre placa base del láser y placa superior que soporta la óptica al juntarlas con el tornillo.....	24
<b>Figura 3.3:</b> Placa superior, con tres agujeros con hilo 8-32 (M4 x 0,7) para unir y fijar a placa base, evitando contacto térmico a través de cilindros de PVC en cada tornillo, dos agujeros con hilo M3 x 0,5 para montura que sostiene tubo de colimación y un agujero con hilo 8-32 (M4 x 0,7) para colocar L de aluminio que soporta montura con red de difracción.....	25
<b>Figura 3.4:</b> Sistema que desplaza la red, variando la cavidad externa y soporte para la red. Se observa “L” de aluminio y el soporte para la red, medidas en [mm].....	26
<b>Figura 3.5:</b> Montura de fabricación propia que soporta el cilindro para el lente esférico y diodo láser.....	27
<b>Figura 3.6:</b> Se muestran elementos para soporte del diodo láser y lente esférico, a la izquierda la tapa de aluminio que centra el diodo láser y socket, a la derecha el cilindro en donde se coloca el diodo láser y el lente esférico, el hilo permite girar el lente hasta colimar el haz de salida del láser.....	28
<b>Figura 3.7:</b> Montura diseñada para soportar tubo de colimación LT230P-B.....	28
<b>Figura 3.8:</b> Esquema de placas frontal y posterior del láser, en la placa frontal se observan cuatro agujeros de 3 [mm] de diámetro que sostienen el circuito de protección de corriente, más arriba el agujero para el conector del controlador de corriente y a la izquierda la perforación para salida del láser. La placa posterior tiene un agujero para el BNC que alimenta el piezoeléctrico que desplaza la red de difracción y a la derecha la perforación para el conector del controlador de temperatura.....	29
<b>Figura 3.9:</b> Esquema de las paredes de acrílico, a la izquierda la tapa del láser, a la derecha una de las placas de los lados, con la canaleta para desplazarse por las placas de aluminio.....	30

<b>Figura 3.10:</b> Vista superior de base pequeña que contiene sistema óptico, se muestra ángulo correspondiente para incidencia en la red de difracción según parámetros calculados en configuración Littrow.....	31
<b>Figura 3.11:</b> Circuitos de protección de corriente, a) conexión para diodo láser en uso y otro modelo con la misma configuración y polaridad AG, b) se observa el mismo tipo de conexiones pero para diodos láser con configuración física distinta al caso anterior respecto de sus terminales, pero son polaridad AG también.....	32
<b>Figura 3.12:</b> Esquema del diodo láser y el lente esférico dentro del tubo de colimación.....	33
<b>Figura 3.13:</b> Fotografía con vista superior del láser construido, sus elementos, un esquema de la salida del láser y las conexiones correspondientes.....	35
<b>Figura 3.14:</b> Fotografía de uno de los espejos utilizados en la construcción del interferómetro.....	36
<b>Figura 3.15:</b> Montura que soporta espejo con piezoeléctrico.....	37
<b>Figura 3.16:</b> Montura para espejo y cilindro con hilo interior, en el lado izquierdo el anillo con hilo interior, a la derecha la pieza porta-espejo con hilo exterior M20 x 0,5, diámetro menor para tope del espejo y paso de la luz y agujero con hilo 6-32 para sostener el espejo.....	38
<b>Figura 3.17:</b> Placa base del interferómetro, donde se ubican las bases BA2 que sostienen los espejos del interferómetro, usando 4 tornillos con hilo 1/4-20.....	39
<b>Figura 3.18:</b> Placas frontal y posterior de la caja del interferómetro.....	40
<b>Figura 3.19:</b> Tapa en “U” para el interferómetro, las placas usadas son de aluminio de 5 [mm] de espesor, se usan tornillos M3 unir las placas.....	41
<b>Figura 3.20:</b> Configuración del interferómetro construido y conexión BNC de alto voltaje para el piezoeléctrico.....	42
<b>Figura 3.21:</b> Montaje experimental para medición de la longitud de onda del láser.....	43
<b>Figura 3.22:</b> Montaje experimental para medición de los modos usando interferómetro Fabry-Perot confocal.....	45
<b>Figura 3.23:</b> Montaje experimental para medición de rango de barrido del láser.....	46

<b>Figura 3.24:</b> Placa superior, con agujero adicional para sostener montura KM100B (Thorlabs), “A” denota el nuevo agujero con hilo 8-32.....	47
<b>Figura 3.25:</b> Fotografías usando la montura KM100B, a la izquierda la red pegada en la cara frontal de la montura, a la derecha un acercamiento a la zona donde se ubica el piezoeléctrico.....	48
<b>Figura 3.26:</b> Montaje experimental para calibración del láser usando celda de calibración.....	49
<b>Figura 3.27:</b> Diodos láser de 5,6 y 9 [mm] de diámetro.....	50
<b>Figura 3.28:</b> Fotografías de los piezoeléctricos utilizados para la medición de rango de barrido del láser, arriba, a la izquierda el conjunto de los dos piezoeléctricos de disco soldados, a la derecha piezoeléctrico de disco tipo C5500 y abajo piezoeléctrico Thorlabs.....	51

#### Capítulo 4: Resultados

<b>Figura 4.1:</b> Imagen obtenida usando el programa Splicco, siendo posible apreciar la longitud de onda del láser.....	53
<b>Figura 4.2:</b> Imagen obtenida desde el programa Splicco, usando diodo láser Hitachi (HL6714G), con una corriente de 47,4 [mA] y temperatura de 20,3 [°C].....	53
<b>Figura 4.3:</b> Imagen obtenida desde el programa Splicco, usando diodo láser Hitachi (HL6714G), con una corriente de 46,3 [mA] y temperatura de 20,7 [°C].....	54
<b>Figura 4.4:</b> Imagen obtenida desde el programa Splicco, usando diodo láser Hitachi (HL6714G), con una corriente de 47,1 [mA] y temperatura de 20,7 [°C].....	54
<b>Figura 4.5:</b> Modos del láser, usando diodo láser HL6714G, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del interferómetro es una señal triangular positiva de 99,2 [V] peak to peak. La cavidad no se encuentra a la distancia confocal.....	55
<b>Figura 4.6:</b> Modos del láser, usando diodo láser HL6714G, 46,9 [mA] de corriente de operación del láser y 20,7 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del interferómetro es una señal triangular positiva de 84,8 [V] peak to peak, 180 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 3 [GHz].....	56

<b>Figura 4.7:</b> Modos del láser, usando diodo láser HL6714G, 46,3 [mA] de corriente de operación del láser y 20,7 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del interferómetro es una señal triangular positiva de 376 [V] peak to peak, 181 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 3 [GHz].....	57
<b>Figura 4.8:</b> Acercamiento al primer peak de la Fig. 4.7, permitiendo observar su simetría.....	58
<b>Figura 4.9</b> Modos del láser, usando diodo láser HL6714G, 46,3 [mA] de corriente de operación del láser y 20,7 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del interferómetro FPI 100 es una señal triangular positiva de 42,8 [V] peak to peak, 100 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 1 [GHz].....	59
<b>Figura 4.10:</b> Acercamiento al primer peak de la Fig. 4.9, permitiendo observar su simetría.....	60
<b>Figura 4.11:</b> Modos del láser, usando diodo láser TOL9221M, 41,8 [mA] de corriente de operación del láser y 23,1 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del láser es una señal triangular positiva de 700 [V] peak to peak, 740 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 2 [GHz] (FPI Burleigh).....	61
<b>Figura 4.12:</b> Modos del láser, usando diodo láser TOL9221M, 42,2 [mA] de corriente de operación del láser y 22,6 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del láser es una señal triangular de 1000 [V] peak to peak, 20 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 2 [GHz] (FPI Burleigh).....	62
<b>Figura 4.13:</b> Modos del láser, usando diodo láser TOL9221M, 43 [mA] de corriente de operación del láser y 23,1 [°C] de temperatura, el voltaje aplicado al piezoeléctrico del láser es una señal triangular positiva de 90,3 [V] peak to peak usando fuente de poder MDT693A (Thorlabs), 8 [Hz] de frecuencia. El rango espectral libre es de 3 [GHz] (FPI construido).....	63
<b>Figura 4.14:</b> Medición de corriente v/s voltaje del fotodiodo, diodo láser a 22,8 [°C], usando fotodiodo DET10A y amplificador de señal a $1 \times 10^5$ .....	64
<b>Figura 4.15:</b> Gráfico de longitud de onda del láser v/s temperatura.....	65

<b>Figura 4.16:</b> Gráfico de longitud de onda del láser v/s corriente para un temperatura de 30,5 [°C].....	65
<b>Figura 4.17:</b> Rampa de modulación de corriente de 560 [mV] peak to peak, frecuencia de 4 [Hz] y señal del fotodiodo ubicado a la salida de la celda de absorción. Temperatura de la celda 302 [°C] y 3 [Torr] de helio (gas buffer).....	66
<b>Figura 4.18:</b> Modos del láser, usando Fabry-Perot confocal construido, FSR 3 [GHz].....	66
<b>Figura 4.19:</b> Rampa de modulación de corriente de 560 [mV] peak to peak, frecuencia de 4 [Hz] y señal del fotodiodo ubicado a la salida de la celda de absorción. Temperatura de la celda 382 [°C] y 3 [Torr] de helio (gas buffer).....	67
<b>Figura 4.20:</b> Modos del láser, usando Fabry-Perot confocal construido, FSR 3 [GHz].....	67
<b>Figura 4.21:</b> Rampa de modulación de corriente de 560 [mV] peak to peak, frecuencia de 4 [Hz] y señal del fotodiodo ubicado a la salida de la celda de absorción. Temperatura de la celda 540 [°C] y 3 [Torr] de helio (gas buffer).....	68
<b>Figura 4.22:</b> Modos del láser, usando Fabry-Perot confocal construido, FSR 3 [GHz].....	68

Capítulo 6: Factibilidad de uso de láser de diodo sintonizable en aplicaciones industriales

<b>Figura 6.1.</b> Sistema para medición de vapor de agua, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.....	73
---	----

Capítulo 7: Discusión

<b>Figura 7.1.</b> Transmisión de cada uno de los elementos presentes en el diodo láser de cavidad externa en función de la frecuencia incidente. En la parte superior la transmisión de la red de difracción de 1200 [líneas/mm], en el centro la transmisión de la cavidad interna y en la parte baja la transmisión de la cavidad externa.....	78
---	----

**Figura 7.2.** Trasmisión total de láser, que es el producto de la transmisión de la red de difracción de 1200 [líneas/mm], la trasmisión de la cavidad interna de 450 [ $\mu\text{m}$ ] del diodo láser y la trasmisión de la cavidad externa.....79

**Figura 7.3.** Trasmisión de cada uno de los elementos presentes en el diodo láser de cavidad externa en función de la frecuencia incidente. En la parte superior la trasmisión de la red de difracción, en el centro la trasmisión de la cavidad interna y en la parte baja la trasmisión de la cavidad externa.....80

**Figura 7.4.** Trasmisión total de láser, que es el producto de la transmisión de la red de difracción de 2400 [líneas/mm], la trasmisión de la cavidad interna de 450 [ $\mu\text{m}$ ] del diodo láser y la trasmisión de la cavidad externa.....81

**Figura 7.5.** Trasmisión de cada uno de los elementos presentes en el diodo láser de cavidad externa en función de la frecuencia incidente. En la parte superior la trasmisión de la red de difracción, en el centro la trasmisión de la cavidad interna y en la parte baja la trasmisión de la cavidad externa.....82

**Figura 7.6.** Trasmisión total de láser, que es el producto de la transmisión de la red de difracción de 1200 [líneas/mm], la trasmisión de la cavidad interna de 400 [ $\mu\text{m}$ ] del diodo láser y la trasmisión de la cavidad externa.....83



# Índice de Tablas

Capítulo 2: Teoría

**Tabla 2.1.** Propiedades físicas fundamentales del litio.....20

Capítulo 6: Factibilidad de uso de láser de diodo sintonizable en aplicaciones industriales

**Tabla 6.1.** Detalle de piezas para construcción de láser de diodo sintonizable.....74

**Tabla 6.2.** Detalle de piezas para la construcción de interferómetro.....75