

UNIVERSIDAD DE  
GUANAJUATO



**División de Ciencias e Ingenierías**  
**Universidad de Guanajuato, Campus León**

## **Láser de fibra óptica multi-longitud de onda como fuente de bombeo para generación de luz en el mediano IR**

**Licenciatura en Ingeniería Física**

**Jesús Eliseo Vázquez Monzón**

Tesis Licenciatura

**Asesor:**

**Dr. Gilberto Anzueto Sánchez**

Centro de investigaciones en Óptica



## Agradecimientos

A mis padres y hermano, Jesús Cesar Vázquez García, Patricia Monzón Tovar y Cesar Ulises Vázquez Monzón por ser mi mayor fuente de apoyo, fortaleza y amor incondicional. Gracias por enseñarme con su ejemplo que los sueños se alcanzan con esfuerzo, dedicación y fe. Todo lo que soy y que logro se lo debo a ustedes.

A mis tíos Marco Vazquez García y Olga Barrios Martínez por creer en mí y estar siempre dispuestos a ayudarme. Sus palabras de aliento y confianza en mí han sido fundamentales para superar cada desafío.

A todas las amistades que he tenido en la división de ciencias e ingenierías, en especial a Luis Ángel Salazar Martínez, Iñigo Alonso Perea Campos, Alicia Aldana Pérez, Mariana Camacho González y Alexa Renata Rodríguez Aguilera, quienes han sido mucho más que compañeros. Con ustedes compartí risas, aprendizajes y momentos que llevaré siempre en mi corazón. Gracias por estar conmigo en los días difíciles; su amistad me ha hecho crecer y ser una mejor persona.

Al Doctor Gilberto Anzueto Sánchez por la confianza y la oportunidad de participar en el desarrollo de este trabajo y a Myriam Cristina Jiménez Mares por su guía en el laboratorio. Sus enseñanzas y apoyo me han dejado aprendizajes que trascienden este trabajo.

Al CONAHCyT por la beca otorgada bajo el proyecto de Ciencia de Frontera CF-2023-I-753 “Extensión de la longitud de onda hacia el mediano IR de los láseres de fibra óptica de vidrio sílice”,

# Contenido

<b>Lista de figuras.</b>	5
<b>1. Introducción</b>	7
1.1. Láseres de fibra óptica.	7
1.2. Sistemas láser “Q-switch”	10
1.3. Modelo teóricos y simulaciones.	12
1.4. Aplicaciones.	17
<b>2. Objetivos</b>	18
2.1. Construcción de láser de fibra óptica.	18
2.2. Aplicaciones en el sensado de gases y generación de luz en el mediano infrarrojo.	18
<b>3. Metodología</b>	22
3.1. Diseño de construcción.	22
3.2. Materiales y métodos.	27
3.2.1. Experimento 1. Caracterización con filtro óptico MZI 40 cm.	30
3.2.2. Experimento 2. Caracterización rejilla de periodo largo.	31
3.2.3. Experimento 3. Caracterización con rejilla de periodo largo en sistema láser.	32
<b>4. Resultados</b>	33
4.1. Experimento 1. Caracterización con filtro óptico MZI 40 cm.	33
4.2. Experimento 2. Caracterización rejilla de periodo largo.	36
4.3. Experimento 3. Caracterización con rejilla de periodo largo en sistema láser.	38
<b>5. Discusión</b>	48
<b>6. Conclusión</b>	50
<b>7. Referencias</b>	51
<b>8. Apéndice A</b>	54

## Lista de figuras.

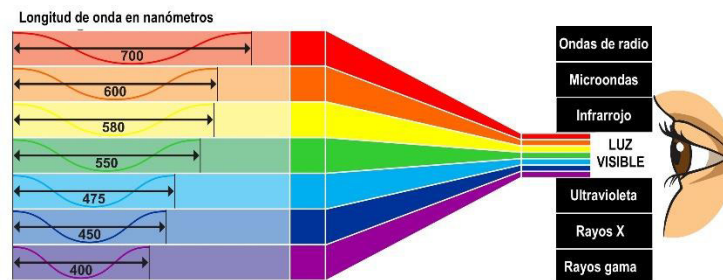
<b>FIGURA 1.</b> ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO. [2] .....	7
<b>FIGURA 2.</b> NIVELES DE ENERGÍA DE SISTEMA LÁSER. ....	12
<b>FIGURA 3.</b> GRÁFICO DE EVOLUCIÓN TEMPORAL DE NIVELES DE ENERGÍA DEL ERBIO (N2) Y TULIO (N5) .....	14
<b>FIGURA 4.</b> DENSIDAD DE FOTONES EN EL SISTEMA Q-SWITCH. ....	15
<b>FIGURA 5.</b> DENSIDAD DE FOTONES A DIFERENTES POTENCIAS DE BOMBEO. ....	16
<b>FIGURA 6.</b> GRÁFICO DE FRECUENCIAS RESPECTO A POTENCIA. ....	16
<b>FIGURA 7.</b> LÍNEAS DE ABSORCIÓN DEL GAS ACETILENO [15]. ....	19
<b>FIGURA 8.</b> NIVELES DE ENERGÍA EN LA BANDA P DEL ACETILENO [17]. ....	21
<b>FIGURA 9.</b> DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA. ....	22
<b>FIGURA 10.</b> DIAGRAMA DE INTERFERÓMETRO [21]. ....	25
<b>FIGURA 11.</b> DIAGRAMA DE RPL. ....	27
<b>FIGURA 12.</b> DIAGRAMA DE SISTEMA LÁSER. ....	28
<b>FIGURA 13.</b> EMPALMADORA Y DIODO UTILIZADO PARA BOMBEO. ....	29
<b>FIGURA 14.</b> ETAPA DE AISLADOR Y WDM PARA CAVIDAD DE ANILLO. ....	30
<b>FIGURA 15.</b> DIAGRAMA A DE LÁSER. ....	30
<b>FIGURA 16.</b> MONTAJE PARA CARACTERIZACIÓN DE RPL. ....	31
<b>FIGURA 17.</b> MONTURA NEWPORT 423 SERIES UTILIZADA PARA ALTERAR LAS CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS DE LA REJILLA DE PERIODO LARGO [25]. ....	32
<b>FIGURA 18.</b> PERTURBACIÓN DE TENSIÓN EN REJILLA DE BRAGG. ....	33
<b>FIGURA 19.</b> CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTO 1. <b>A)</b> ESPECTRO ÓPTICO CON VARIACIÓN DE CORRIENTE. <b>B)</b> SECUENCIAS DE PULSOS .....	34
<b>FIGURA 20.</b> GRÁFICO DE POTENCIA VS FRECUENCIA DE PULSOS. ....	35

<b>FIGURA 21.</b> GRÁFICO DE ESPECTRO ÓPTICO ANTE CADA DESPLAZAMIENTO DE LA REJILLA. ....	36
<b>FIGURA 22.</b> DESPLAZAMIENTO DE REJILLA.....	37
<b>FIGURA 23.</b> GRÁFICO DE ESPECTRO ÓPTICO ANTE CADA DESPLAZAMIENTO DE LA REJILLA. ....	38
<b>FIGURA 24.</b> CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA LÁSER: <b>A)</b> ESPECTRO ÓPTICO CON VARIACIÓN DE CORRIENTE. <b>B)</b> SECUENCIA DE PULSOS CORRESPONDIENTE. <b>C)</b> INTERVALO DE DOS PULSOS A 100 mA (60 mW). ....	39
<b>FIGURA 25.</b> ESPECTRO ÓPTICO CON ALTERACIÓN A LA REJILLA CADA 0.5 mm. <b>A)</b> BARRIDO DE LONGITUDES DE ONDA A 70 mA. <b>B)</b> BARRIDO EN DOS DIMENSIONES DEL RANGO A 120 mA. ....	41
<b>FIGURA 26.</b> COMPARACIÓN A 0 mm Y 2.5 mm DE DESPLAZAMIENTO A 120 mA. ....	42
<b>FIGURA 27.</b> ANCHO DE PULSOS DEPENDIENTE DE LA CORRIENTE INCIDENTE Y DESPLAZAMIENTO. ....	43
<b>FIGURA 28.</b> <b>A)</b> ESPECTRO ÓPTICO A DIFERENTES CORRIENTES CON UN DESPLAZAMIENTO EN LA REJILLA DE 2.5 mm <b>B)</b> PULSOS A DIFERENTES CORRIENTES INCIDENTES A UN DESPLAZAMIENTO FIJO DE REJILLA A 2.5 mm. ....	45
<b>FIGURA 29.</b> <b>A)</b> ANCHO Y FRECUENCIA DE PULSOS EN FUNCIÓN DE POTENCIA DE BOMBEO. <b>B)</b> POTENCIA DE SALIDA Y VARIACIÓN DE ANCHO DE PULSO EN FUNCIÓN DE POTENCIA DE BOMBEO.....	46

# 1. Introducción

## 1.1. Láseres de fibra óptica.

La tecnología láser “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” son dispositivos que generan o amplifican radiación coherente en algún rango del espectro electromagnético. Se denomina al espectro electromagnético al conjunto de todas las ondas electromagnéticas que se extiende desde los rayos gamma y rayos X (pertenecientes a longitudes de onda menores), hasta las ondas de radio con la mayor longitud de onda. Su descubrimiento fue a raíz de los experimentos y aportes de Maxwell formalizando el electromagnetismo en que por consiguiente predijeran la existencia de las ondas electromagnéticas [1].



*Figura 1. Espectro electromagnético [2].*

Las unidades utilizadas para las longitudes de onda son el nanómetro y en algunos casos los ångstroms. En general el rango del espectro al cual es sensible el ojo humano va desde los 380 a 760 nm y es pequeño considerando todo el espectro. A pesar de esto la tecnología nos ha dado sensores con los que se puede mediante cámaras especiales poder observar las longitudes de onda que son “invisibles” al ojo humano.

El láser basa sus principios de funcionamiento en los procesos de emisión (espontánea y estimulada), así como de absorción mediante la interacción del campo electromagnético con la materia. Los componentes principales para la construcción de un láser son los siguientes [1]:

- **Medio activo:** El medio activo es el encargado de amplificar la luz proveniente de la fuente de bombeo mediante el proceso de absorción y

emisión, en este proceso, los iones del medio se excitan a niveles de energía superiores, posteriormente al volver a su nivel energético más bajo emiten luz coherente a una diferente longitud de onda de la fuente de bombeo.

- **Fuente de bombeo:** La fibra óptica con el medio activo se “bombea” con luz de energía superior con el objetivo de aumentar el nivel de energía del medio. La longitud de onda de este bombeo debe ser especificada dependiendo del tipo de láser y el rango del espectro electromagnético que se desea en la salida del sistema.
- **Cavidad óptica:** Para lograr la amplificación de la luz en el sistema se necesita una cavidad de retroalimentación. Para un láser de fibra óptica estas cavidades se realizan con rejillas de Bragg, debido a sus propiedades ópticas una de las rejillas actúa como un espejo de alta reflectividad, mientras que otra rejilla como espejo de baja reflectividad para la salida.

La consolidación de los láseres de estado sólido y los avances de la tecnología en fibras ópticas dieron paso a la fabricación de láseres cuya guía de onda fuera una fibra óptica. En 1961 Elias Snitzer demostró su funcionamiento no solamente de la propagación de luz a través de la fibra, sino que también el medio activo se encontraba en el núcleo con átomos de neodimio. Esta demostración fue clave para los años posteriores debido a que la investigación y desarrollo de fibras ópticas con los elementos conocidos como “tierras raras” comenzó un auge debido a su manera de fabricación y aplicaciones para diferentes ramas. Para 1986 David Payne propuso el dopado de una fibra óptica con Erblio (elemento de las tierras raras) como medio activo. La fabricación de estas fibras ópticas permitió que con un medio de bombeo adecuado se excite al erbio emitiendo fotones en los procesos de absorción y emisión a 1550 nm, esto impulsó en gran medida a las telecomunicaciones. Físicamente el desarrollo de los láseres de fibra óptica ha evolucionado constantemente entendiendo los procesos de amplificación y las áreas de mejora en los sistemas, como lo fue con las cavidades ópticas, pasando de utilizar una cavidad lineal con dos espejos a una cavidad de anillo unidireccional, donde con el



uso de un aislador óptico o circulador garantiza que se cree un bucle minimizando los problemas de interferencia o generación de oscilaciones no deseadas. En este tipo de sistemas la salida de la luz se realiza mediante un acoplador óptico, permite que una parte de la luz salga de la cavidad hacia el observador, mientras que otra parte de la luz circula continuando el proceso de amplificación y retroalimentación. Las ventajas encontradas en este tipo de cavidades han hecho que la física de láseres evolucione constantemente con nuevas aplicaciones como láseres de alta eficiencia con una ganancia constante o láseres pulsados de alta potencia [3].

Los láseres de fibra óptica han desempeñado un papel crucial en la espectroscopia gracias a sus características únicas de alta potencia, estabilidad y capacidad de emitir luz en una amplia gama de longitudes de onda, facilitando avances tanto en la precisión como en la sensibilidad de las mediciones. La región de longitudes de onda pertenecientes al infrarrojo son una parte del espectro electromagnético en el cual este tipo de láseres tienen una amplia aplicación ya que permite identificar compuestos y analizar la composición química de una sustancia, ya que cada molécula tiene un espectro infrarrojo único.

La radiación infrarroja (IR) es un tipo de radiación electromagnética con un rango de longitudes de onda desde 0.7 a 1000 micrómetros. La principal fuente de este tipo de radiación es el calor o radiación térmica. Los dispositivos de visión nocturna que utilizan iluminación activa en el infrarrojo cercano permiten observar a personas o animales sin que el observador sea detectado. Su descubrimiento fue en 1800 por William Herschel mediante la observación de su efecto en un termómetro. El IR es clasificado dependiendo de su longitud de onda de la siguiente manera [4]:

- **Infrarrojo cercano:** Con un rango de  $0.7 - 1.4 \mu m$  el infrarrojo cercano es la región más cercana en longitud de onda a la radiación detectable por el ojo humano y es utilizado en telecomunicaciones debido a las bajas pérdidas de atenuación en las fibras ópticas, además de la espectroscopia en IR cercano utilizada en la medicina para identificación de tumores.
- **Infrarrojo medio:** Este rango de longitudes de onda también conocido como infrarrojos térmicos tiene diferentes definiciones dependiendo del tipo de

aplicación al que sea requerido. La asociación internacional de iluminación lo define entre  $3 - 1000 \mu m$ , en las aplicaciones militares está entre  $3 - 5 \mu m$  y finalmente en la tecnología láser es de  $1.4 - 3 \mu m$ . El infrarrojo medio se genera principalmente a través de la emisión térmica de objetos calientes, la absorción y reemisión por moléculas atmosféricas y la emisión de fuentes astronómicas.

- **Infrarrojo lejano:** Con un rango de  $3 - 1,000 \mu m$  situado entre el IR lejano y las ondas de radio el IR lejano solo es significativa en cuerpos muy fríos con apenas unos grados por encima del cero absoluto, sus aplicaciones en astronomía permiten estudiar las propiedades de gases y polvos del universo. En la creación de imágenes tomadas por telescopio se detectan longitudes de onda en el IR lejano que posteriormente se sustituyen por color falso que da una versión visible a lo detectado por el telescopio.

## 1.2. Sistemas láser “Q-switch”.

Con la invención del láser las aplicaciones en el campo científico e industrial aumentaron significativamente. Los experimentos en óptica no lineal y física de materiales hacían necesario que los láseres de la época produjeran pulsos de alta potencia, rango en el que los láseres continuos no podían operar aún. Los avances en el área comenzaron mediante investigaciones de métodos para almacenar la energía del medio activo y liberarla en forma de pulsos controlados, esto podría lograrse mediante una alta pérdida óptica en la cavidad evitando la emisión inmediata en el sistema y posteriormente reducir repentinamente estas mismas, al reducirlas la energía almacenada en el medio activo se liberaría en un pulso de alta potencia. Esta técnica de pérdidas dentro de la cavidad fue realizada primero por científicos estadounidenses mediante moduladores electroópticos y acusto-ópticos [5] produciendo los primeros láseres con pulsos cortos de alta potencia [6].

Las dificultades de los primeros láseres Q-switch por su complejo sistema y costo llevó a los científicos a explorar nuevas alternativas que permitieran fabricar láseres pulsados, pero ahora con un sistema más simplificado. Esto llevó a una nueva área de investigación con los láseres Q-switch pasivo.

El Q-switch pasivo se basa en el uso de un absorbedor saturable en la cavidad del sistema láser. Un absorbedor saturable es un material cuya capacidad de absorber luz disminuye cuando la intensidad incidente aumenta en un cierto umbral, su comportamiento no lineal en el coeficiente de absorción a baja intensidad actúa como una pérdida dentro de la cavidad láser, cuando el material se satura su capacidad de absorción disminuye, las pérdidas de la cavidad igualmente disminuyen permitiendo que la energía acumulada en el medio activo sea liberada de manera abrupta en forma de pulso. Este ciclo se repite, lo que permite que estos pulsos sean generados de manera sucesiva. En condiciones de baja intensidad un absorbedor saturable tiene un coeficiente de absorción relativamente alto, ya que la mayoría de sus centros de absorción están en su estado fundamental listos para absorber fotones. Sin embargo, cuando la intensidad de la luz aumenta y llega a un nivel crítico, los centros de absorción se "saturan", el resultado es una disminución del coeficiente de absorción, un fenómeno conocido como "absorción saturable". En el proceso de la absorción saturable del sistema dependiendo del tipo de absorbedor utilizado y su fuente de bombeo es posible controlar el rango del espectro electromagnético en el cual haya un máximo de emisión láser, por lo que en este trabajo se dará un mayor énfasis a los efectos de bombeo y emisión en el rango del infrarrojo medio generados a partir de las transiciones energéticas del absorbedor [7].

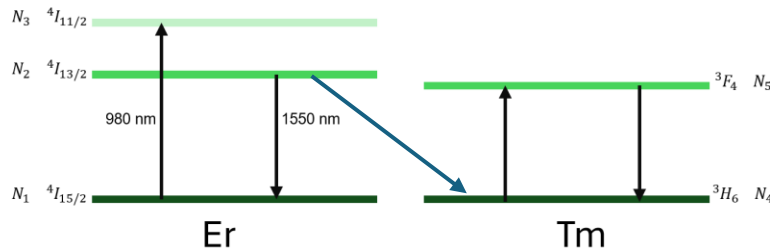
En este trabajo de tesis se estará construyendo un láser Q-switch del tipo de cavidad anillo con un absorbedor saturable de Tulio-Holmio. Una cavidad tipo anillo, como fue mencionado anteriormente, permitirá una unidireccionalidad de la luz en el sistema que retroalimentará al láser de fibra óptica con la misma luz emitida de la fibra dopada. Diversos modelos teóricos han sido de gran ayuda para la comprensión física del fenómeno de absorción saturable tomando en cuenta la densidad de estados excitados, coeficientes de absorción dependientes del tipo de absorbedor y tiempo de vida medio en el estado excitado [1].

### 1.3. Modelo teóricos y simulaciones.

Las herramientas informáticas han sido una parte fundamental para el desarrollo de la física en años recientes. Muchos problemas que de manera manual no podrían ser resueltos por su complejidad ahora en cuestión de segundos se obtienen con una gran facilidad. Por ello es importante destacar cómo para la física de láseres las simulaciones son un apoyo importante a la hora del diseño y desarrollo de un experimento.

El modelado de un láser Q-switch pasivo se realiza mediante un sistema de ecuaciones diferenciales que describe la densidad de fotones de salida en el sistema y la población en los niveles de energía del medio activo y absorbedor saturable. En este trabajo de tesis se realizará un modelo de un láser pulsado de Erblio donde el absorbedor saturable es Tulio. Se considera una cavidad óptica formada por una fibra óptica dopada con erbio (Er), otra por tulio (Tm) que será el absorbedor saturable del sistema, un multiplexado de longitud de onda (WDM) y dos espejos de alta y baja reflectividad respectivamente [8].

Considerando un bombeo de 980 nm hacia la fibra óptica del Er consideramos un sistema de tres niveles presentado a continuación:



**Figura 2.** Niveles de energía de sistema láser.

Cuando se bombea con una longitud de onda de 980 nm, la población del nivel de energía del Er  $4I_{13/2}$  aumenta generando una transición entre los niveles  $4I_{13/2} \rightarrow 4I_{15/2}$  y una emisión de fotones a 1550 nm, estos fotones a su vez son absorbidos por el nivel de energía del tulio  $3H_6$  poblando mediante una transición el nivel  $3F_4$ , además de producir una alta pérdida en la cavidad, cuando la población

en el nivel  $^3H_6$  está saturada por las transiciones energéticas persistentes en el Er se alcanza el umbral del sistema generando un pulso de alta potencia. Si este proceso de emisión y absorción es continuo se genera un sistema de láser pulsado a alta potencia que es modelado mediante el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales [9]:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{\tau_r} \left\{ [\sigma_{es}N_2 - \sigma_{as}(N_{Er} - N_2)]l + [\sigma_{es\_sa}N_5 - \sigma_{as\_sa}(N_{Tm} - N_5)]l_{sa} - [\delta - \ln(R_1R_2)] \right\} + \beta N_2 \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = Wp(N_{er} - N_2) - \frac{N_2}{\tau_2} - c\phi[\sigma_{es}N_2 - \sigma_{as}(N_{er} - N_2)] \quad (2)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = -[\sigma_{es\_sa}N_5 - \sigma_{as\_sa}(N_{Tm} - N_5)]c\phi - \frac{N_5}{\tau_5} \quad (3)$$

$$W_p = \frac{\lambda_p \sigma_{ap}}{A h c} P \quad (4)$$

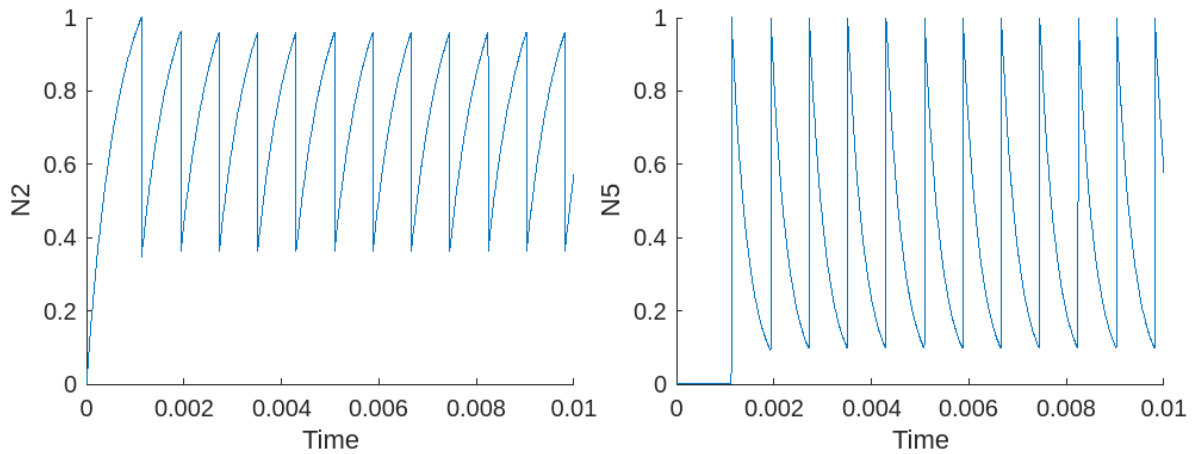
Donde  $\phi$  es la densidad de fotones,  $N_2$  la densidad de población en el nivel  $^4I_{13/2}$  y  $N_5$  la densidad de población en el nivel  $^3F_4$ . Los parámetros del sistema de ecuaciones son los siguientes:

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
$A$	$63.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2$	$R_1$	1	$R_2$	0.8
$l$	9 m	$l_{sa}$	0.2 m	$l_p$	0.3
$N_{Er}$	$1.81 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$	$N_{Tm}$	$5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$	$n$	1.5
$\sigma_{ap}$	$3.1 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	$\sigma_{es}$	$3.6 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	$\sigma_{as}$	$3.6 \times 10^{-26} \text{ m}^2$
$\sigma_{es\_sa}$	$4.92 \times 10^{-25}$	$\sigma_{as\_sa}$	$2.46 \times 10^{-24} \text{ m}^2$	$\beta$	$1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
$\tau_2$	10 ms	$\tau_5$	334.7 $\mu\text{s}$	$\alpha$	0.01

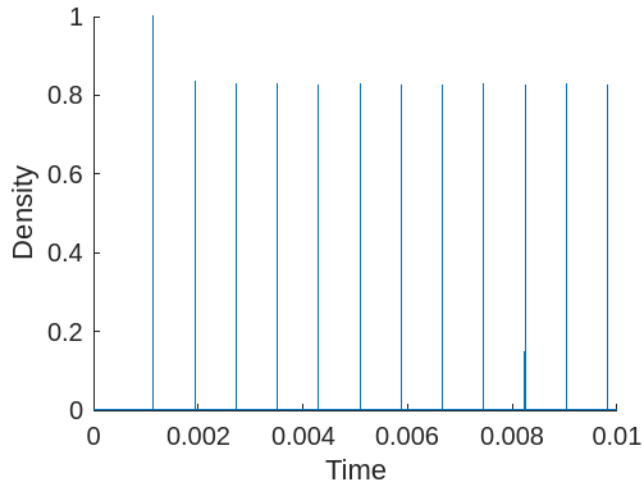
**Tabla 1.** Parámetros de simulación [2].

$\sigma_{es}$  y  $\sigma_{as}$  representan las secciones transversales de emisión y absorción en la fibra de ganancia 1550 nm,  $\sigma_{es\_sa}$ ,  $\sigma_{as\_sa}$  las secciones eficaces de absorción y emisión absorbedor saturable a 1550 nm.  $\delta$  representa la pérdida intrínseca de la cavidad,  $\beta$  es el coeficiente de emisión espontánea que inicia la oscilación láser.  $R_1$ ,  $R_2$  son respectivamente las reflectividades de los espejos de alta y parcial reflectividad,  $W_p$  es la tasa de bombeo relacionada con la potencia de bombeo donde  $\lambda_p$  es la longitud de onda de bombeo  $\sigma_{ap}$  la sección eficaz de la fibra de ganancia y  $h$  la constante de Planck, finalmente  $\tau_2, \tau_5$  son el tiempo de vida de los niveles  $^4I_{13/2}$   $^3F_4$  [10].

Uno de los software más populares en la comunidad científica e industrial es Matlab, sus herramientas numéricas de solución a ecuaciones diferenciales resulta ser una herramienta poderosa para problemas que no puedan ser resueltos manualmente como se mencionó anteriormente. Introduciendo este sistema de ecuaciones con cada parámetro bien definido Matlab arroja tres graficas que representaran la evolución temporal de los niveles de energía para el Er y Tm, además de la densidad de fotones en la salida del sistema **(Apéndice A)**.



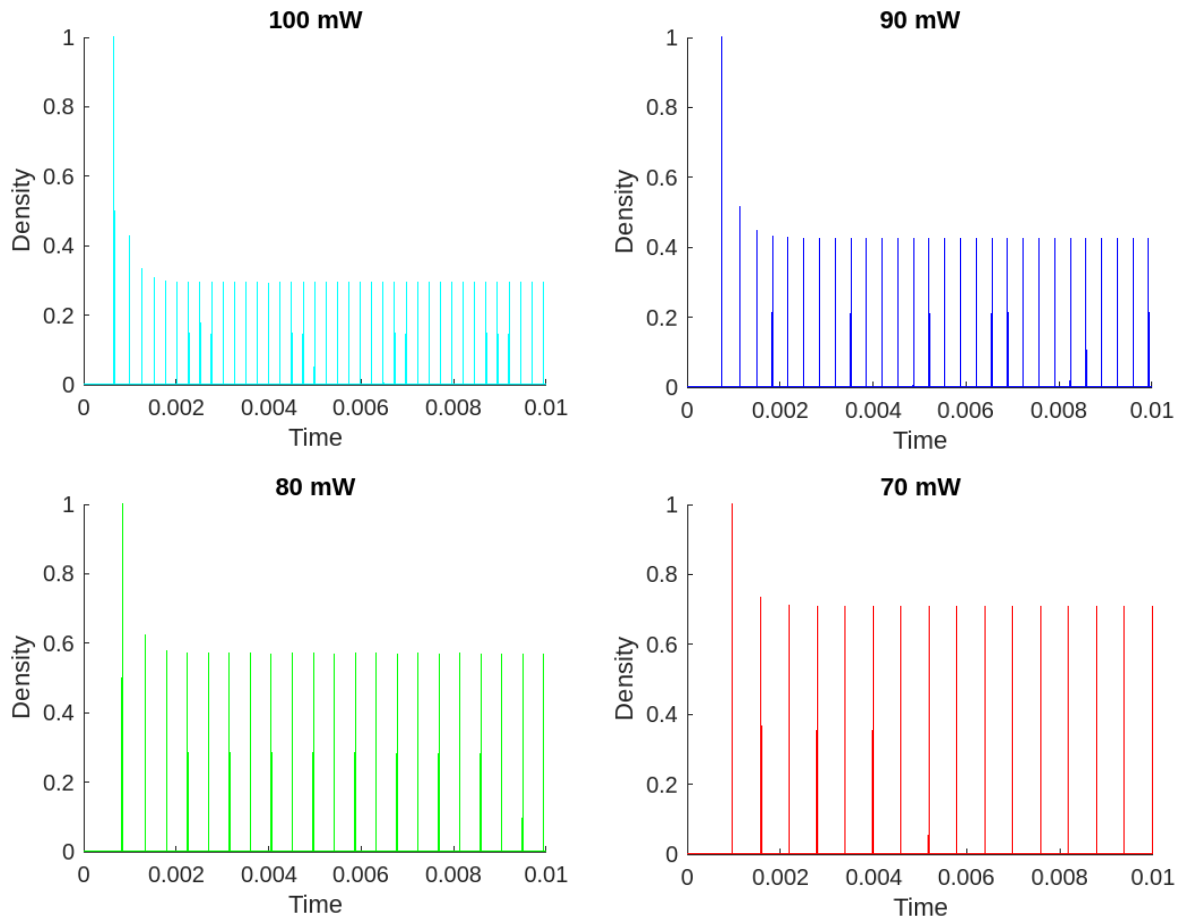
**Figura 3.** Gráfico de evolución temporal de niveles de energía del erbio ( $N_2$ ) y Tulio ( $N_5$ )



**Figura 4.** Densidad de fotones en el sistema Q-switch.

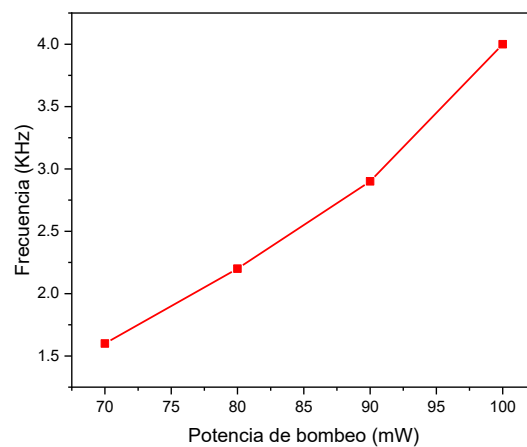
Cada una de las gráficas se normaliza para observar de mejor manera los resultados obtenidos en los cuales para una primera aproximación a un experimento científico real las simulaciones son de una gran ayuda para el diseño que se quisiera realizar, el comportamiento de la secuencia de pulsos obtenido y las transiciones energéticas muestran las características de evolución temporal para el absorbedor saturable.

La potencia de bombeo es uno de los parámetros más importantes de este tipo de láseres, esto debido a que el comportamiento del sistema y los resultados se pueden ver afectados. Para mostrarlo se realizaron cuatro simulaciones con diferentes parámetros de potencia desde 70 mW a 100 mW con un tamaño de paso de 10 mW.



**Figura 5.** Densidad de fotones a diferentes potencias de bombeo.

Como podemos observar en la **figura 5** la densidad de fotones se ve afectada debido al aumento de la potencia de bombeo en el sistema, la frecuencia de la densidad ante ello fue calculada y graficada analizando sus cambios.



**Figura 6.** Gráfico de frecuencias respecto a potencia.



La **figura 6** nos muestra como ante un aumento de la potencia, la frecuencia de los pulsos emitidos igual manera aumenta. Esta simulación será de gran importancia para este trabajo debido a que nos da una primera aproximación al comportamiento observado de los pulsos y frecuencias del sistema.

#### **1.4. Aplicaciones.**

Como fue mencionado anteriormente, los sistemas de láseres Q-switch se crearon a partir de la demanda de diversas aplicaciones en la industria e investigación. Debido a la alta potencia de los pulsos generados en el procesamiento de materiales se utilizan láseres de alta precisión para el grabado de piezas a escalas milimétricas, además de ser un elemento crucial para el corte de precisión y micro-maquinado en la producción de semiconductores como los microchips [11].

Dos de los campos en donde la tecnología Q-switch es de vital importancia son en las telecomunicaciones e investigación científica. En este primer campo los pulsos son ideales para la transmisión de datos a grandes distancias sin la pérdida de señal, esto sumado al proceso de amplificación resulta esencial para las redes de telecomunicaciones a grandes velocidades cubriendo la demanda de rapidez de datos que en los últimos años ha cobrado gran importancia para la vida cotidiana.

En el campo de la investigación el estudio de fenómenos físicos, químicos y biológicos requieren una tecnología acorde a lo que se quiere obtener como resultado. La espectroscopia láser permite que con una alta resolución temporal se puedan observar transiciones entre estados energéticos de átomos o moléculas, e igualmente para la espectroscopia de absorción en la cual un láser Q-switch puede incidir sus pulsos en las bandas de absorción de un gas en particular para la detección de su fluorescencia y análisis de las características del gas [12].

## 2. Objetivos

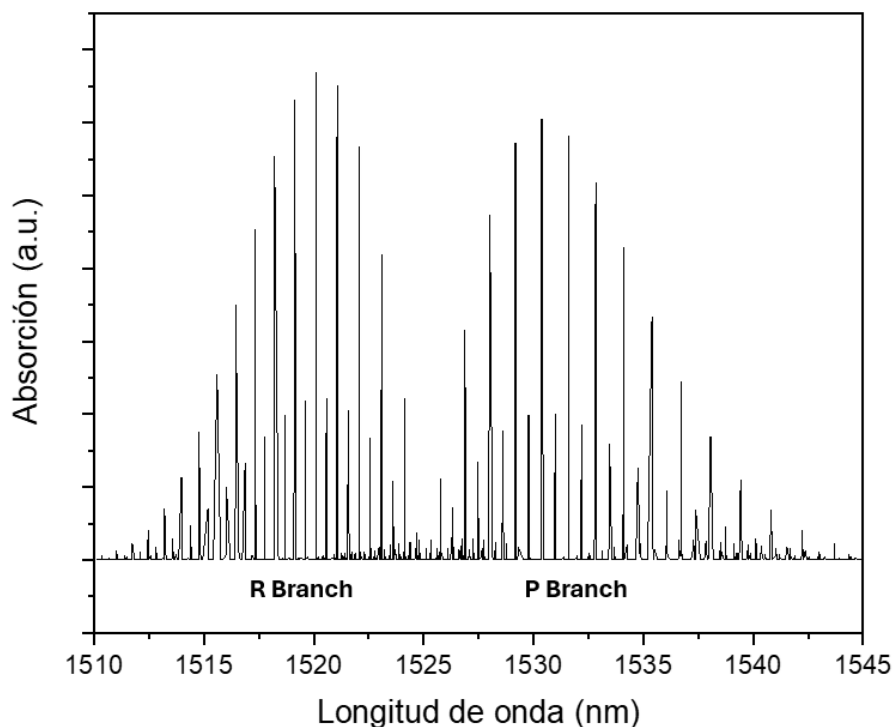
### 2.1. Construcción de láser de fibra óptica.

- Simular al menos cualitativamente el desempeño del sistema láser utilizando las ecuaciones de razón que describen el proceso de “Q-switching” pasivo
- Diseñar y construir un láser de fibra óptica multi-longitud de onda y además pulsado que pueda servir como fuente de bombeo para un sistema de emisión láser en el mediano IR.
- Caracterizar espectralmente y en función del tiempo el sistema láser implementado utilizando para ello un analizador espectral y un foto-detector de respuesta rápida y un osciloscopio.
- Lograr que el sistema láser pueda ser sintonizable, para ello se incluyen diferentes filtros de fibra óptica en la cavidad.

### 2.2. Aplicaciones en el sensado de gases y generación de luz en el mediano infrarrojo.

La detección y el monitoreo de gases es de suma importancia para la industria y disciplinas donde se incluya el control de calidad de aire, seguridad industrial, investigación científica y medio ambiente. La tecnología Q-switch se destaca como una tecnología clave debido a la generación de pulsos intensos de corta duración a una cierta longitud de onda con los que se podrían utilizar para el sensado de gases mediante diversas técnicas. La espectroscopia de absorción basa su procedimiento en el aprovechamiento de las bandas de absorción de los gases y la coincidencia en longitud de onda de un láser Q-switch de tal manera que se pueda indicar la presencia y concentración de gas en un ambiente o muestra. De igual manera la espectroscopia LIDAR aprovecha estas bandas de absorción enviando dos pulsos de longitud de onda diferente en las cuales una sea coincidente con la banda de absorción, mientras que la segunda no, en el análisis de la amplitud de las señales la diferencia entre estas amplitudes es un dato con el cual podemos obtener la concentración de gas en un ambiente controlado [13].

En espectroscopia uno de los gases más utilizados en la investigación es el gas acetileno ( $C_2H_2$ ). Este compuesto químico formado por dos átomos de carbono y dos de hidrogeno es un gas incoloro, altamente inflamable con múltiples aplicaciones en la industria de la soldadura y corte de metales aprovechando las propiedades de alta temperatura de combustión, versatilidad química y su capacidad para reaccionar fácilmente en diversas síntesis [14].



**Figura 7.** Líneas de absorción del gas acetileno [15].

El rango de absorción del gas acetileno se encuentra entre el infrarrojo cercano y mediano infrarrojo. El infrarrojo medio, es la región del espectro donde el acetileno tiene su absorción más fuerte y característica, en esta región las transiciones vibracionales fundamentales de la molécula se hacen evidentes, este rango es crucial para la identificación precisa del acetileno y su análisis cuantitativo. Las bandas de absorción en este rango suelen ser fuertes e intensas, lo que permite una mayor sensibilidad en las mediciones, especialmente en aplicaciones que requieren la detección de concentraciones bajas de acetileno [16].

El acetileno es una molécula lineal, y aunque no es una molécula diatómica sus modos de vibración y rotación se comportan de manera similar a una molécula diatómica en ciertos aspectos. Además de las vibraciones la molécula rota en torno a su eje generando niveles de energía rotacionales que están cuantizados y descritos por el número cuántico rotacional  $J$ . Cuando el acetileno absorbe fotones de una longitud de onda en el rango del infrarrojo la molécula experimenta una transición vibracional que puede ir acompañada de una transición rotacional y emiten fotones de  $3\mu\text{m}$  a través de una transición de modo vibracional.

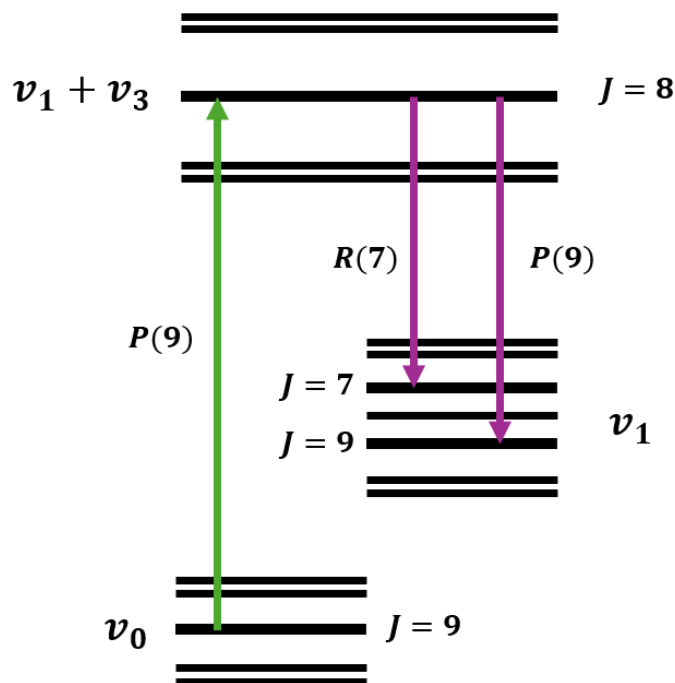
Esto, según las reglas de selección para transiciones rotacionales en el número cuántico  $J$  da lugar a las tres ramas de absorción.

$$\text{Rama R (R - branch): } \Delta J = \pm 1$$

$$\text{Rama Q (Q - branch): } \Delta J = 0$$

$$\text{Rama P (P - branch): } \Delta J = -1$$

En específico para este trabajo se requiere un láser que pueda estar en rango de transmitancia de la rama P del acetileno. Esta rama es particularmente útil en la espectroscopia de absorción debido a que proporciona un conjunto de líneas de absorción bien definidas y espaciadas que permiten, como fue mencionado anteriormente, la detección de bajas cantidades de este gas y además de **emisión** de luz en el mediano infrarrojo. Las transiciones energéticas en el acetileno (**figura 8**) se dividen en varios tipos según el nivel de energía involucrado: rotacionales, vibracionales, y electrónicas. Cuando hablamos de las transiciones en el contexto de la p-branch en el espectro infrarrojo, nos referimos principalmente a transiciones vibracionales acompañadas de cambios en los niveles rotacionales de la molécula [11].



**Figura 8.** Niveles de energía en la banda P del acetileno [17].

Para el acetileno, las transiciones en la p-branch se producen en el contexto de una banda vibracional, una transición entre dos estados vibracionales, como el estiramiento del enlace triple.

- **Transiciones Vibracionales:** La molécula cambia de un estado vibracional inferior (como el estado fundamental) a un estado vibracional superior, generalmente asociado con el estiramiento o flexión de los enlaces [18].
- **Transiciones Rotacionales Simultáneas:** Dentro de cada estado vibracional, la molécula también puede estar en varios subniveles rotacionales. En la p-branch, como fue mencionado anteriormente, estas transiciones implican una disminución en el número cuántico rotacional.

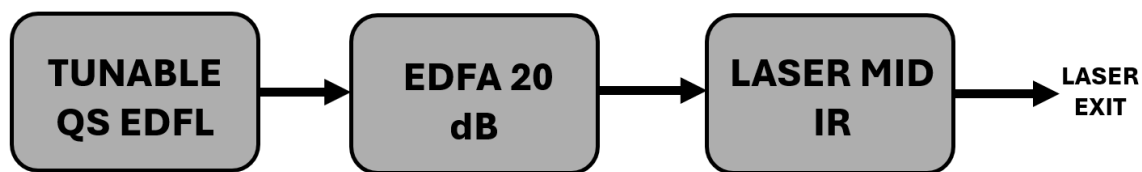
La frecuencia de cada transición en la p-branch puede calcularse usando:

$$\tilde{\nu}_{P(J)} = \tilde{\nu}_0 - 2B \cdot J \quad (5)$$

Donde  $\tilde{\nu}_{P(J)}$  es el numero de onda asociado con el nivel rotacional  $J$ ,  $\tilde{\nu}_0$  es la frecuencia de transición vibracional fundamental,  $B$  es la constante rotacional y  $J$  es el numero cuántico rotacional en el estado excitado.

### 3. Metodología

Con el objetivo de tener un mejor entendimiento del sistema en los niveles de energía y las densidades de fotones se realizó la simulación del sistema de ecuaciones diferenciales para tener una primera aproximación (**sección 1.3**), que en caso de los resultados reales será visto como secuencias de pulsos en el osciloscopio gracias al fotodetector. Es importante tener un entendimiento claro de los fenómenos a observar, por lo que el uso de las simulaciones da una herramienta poderosa en términos de física experimental a los posibles resultados a observar en condiciones ideales antes del proceso de construcción que siguió posterior a esta simulación. De igual manera antes de realizar la construcción del sistema se realizó un diagrama de bloques (**figura 9**) para cada etapa a partir del bombeo en el sistema mediante un láser multi-longitud de onda, amplificación de luz mediante un amplificador de fibra óptica dopada con Erblio, etapa de láser con generación de luz en el mediano infrarrojo y su salida hacia la detección de espectro y pulsos.



*Figura 9. Diagrama de bloques del sistema.*

#### 3.1. Diseño de construcción.

La metodología para el diseño del láser Q-switching utilizado se dividió en las siguientes etapas:

- **Selección del medio activo:** Dependiendo del tipo de aplicación se elige un medio activo con el cual general una amplificación de amplitud láser mediante

un bombeo por un diodo. En este caso se eligió un medio activo de fibra óptica dopada con Erblio (Er) con un bombeo de 980 nm para generación de fotones en estado coherente a 1550 nm.

- **Incorporación del absorbedor saturable en el sistema:** Para el tipo de absorbedor saturable a usar en el sistema se eligió una fibra óptica dopada con Tulio (Tm) y Holmio (Ho) de la marca “CoreActive” de 2m de largo y coeficientes de absorción en 790 nm y 1212 nm de 137 dB/m y 104 dB/m respectivamente [19].
- **Elección del tipo de cavidad óptica:** Una cavidad óptica de tipo anillo permite la generación de pulsos constantes y de alta potencia mediante su unidireccionalidad permitiendo una eficiente acumulación de energía aumentando la intensidad y ganancia del sistema.
- **Elección de filtro óptico:** En específico para este trabajo de tesis se utilizaron dos tipos de filtros ópticos, una rejilla de periodo largo y un interferómetro Mach-Zehnder basado en fibras de pocos modos bajo el principio del efecto Vernier óptico

La etapa de bombeo mediante un diodo está compuesta por una estructura de unión PN formada por dos materiales semiconductores: uno tipo N, que tiene una alta concentración de electrones, y otro tipo P, con una mayor concentración de huecos. Al aplicar una corriente eléctrica en polarización directa, los electrones de la región N son inyectados hacia la región P, mientras que los huecos del material P son inyectados hacia la región N. En la zona de depleción, donde ocurre la recombinación, los electrones se combinan con los huecos, liberando la energía de diferencia entre los niveles de la banda de conducción y la banda de valencia en forma de fotones [20]. La diferencia clave entre un diodo láser y un diodo LED es que el diodo láser está diseñado para inducir emisión estimulada, lo que implica que un fotón emitido puede provocar que otro electrón cercano, al recombinarse con un hueco, libere un segundo fotón con las mismas características (frecuencia, fase y

dirección) que el fotón original. Esta amplificación de la luz mediante emisión estimulada es fundamental para el comportamiento láser.

El diodo láser incluye una cavidad resonante formada por dos superficies reflectantes en los extremos del material semiconductor. Uno de estos extremos es totalmente reflectante, mientras que el otro es parcialmente reflectante, permitiendo la emisión controlada de luz. Los fotones generados por recombinación dentro del semiconductor son reflejados por las paredes de la cavidad, estimulando la emisión de más fotones coherentes. Este proceso es auto consistente, generando una amplificación de la luz dentro de la cavidad. La luz emitida es altamente coherente, lo que significa que los fotones tienen la misma fase y longitud de onda. A diferencia de otras fuentes de luz, la luz emitida por un diodo láser es monocromática (una sola longitud de onda) y direccional, lo que resulta en un haz de luz altamente colimado.

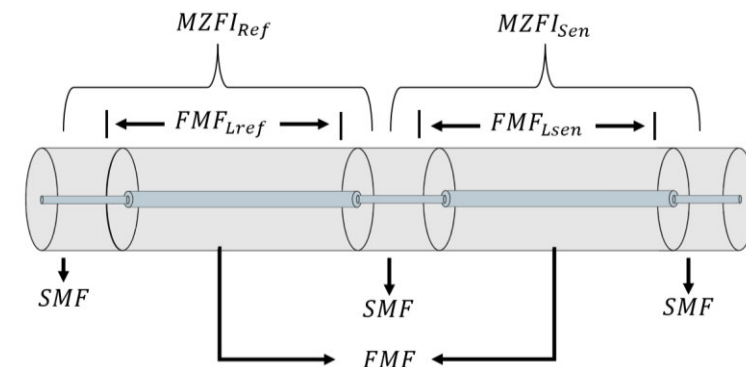
La amplificación de luz en el sistema se realiza mediante la absorción y emisión con átomos de Erblio inmersos en nuestra guía de onda. Los fotones absorbidos subirán el nivel de energía de los electrones de esta tierra rara para posteriormente volver a su estado base emitiendo fotones a 1550 nm. Como fue mostrado anteriormente **(figura 2)**, este sistema se compone además de un absorbedor saturable de Tulio-Holmio en el cual los fotones emitidos por el Erblio serán absorbidos por el Tm saturando su nivel de energía superior hasta que se alcance el umbral de emisión láser pulsada. Un circulador óptico integrado permite que la luz en la guía de onda viaje en una sola dirección sin que se devuelva al puerto de origen. Aprovechando el la birrefringencia de materiales y el uso de materiales magneto-ópticos se logra que la luz entrante a uno de los puertos sea desviada al siguiente proporcionando un aislamiento óptico y bajas pérdidas hacia la salida. Debido a que una parte de la luz se encuentra en el sistema para la retroalimentación un aislador óptico permite la unidireccionalidad de la señal óptica hacia la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) en la cual los haces de múltiples longitudes de onda son propagados por la misma fibra óptica. En telecomunicaciones y láseres Q-switch la tecnología WDM es de vital importancia debido al aumento del ancho de banda a



comparación de comunicaciones y propagación en fibras con haz único permitiendo la transmisión de mayor numero de datos al mismo tiempo.

Los objetivos marcados en este proyecto demandan que el rango de operación se encuentre en el mediano infrarrojo, esto resulta un reto a afrontar debido a que la sintonización de un sistema láser es una de las partes más importantes hacia la aplicación que se requiere. Una manera en la cual se puede hacer esta sintonización para lograr emisión láser en el rango requerido es mediante el uso de interferómetros Mach-Zehnder basado en fibras de pocos modos o rejillas de Bragg de periodo largo.

Un interferómetro Mach-Zehnder basado en fibras de pocos modos se compone por una estructura concatenada de SMF-FMF-SMF que es aprovechada para obtener el efecto Vernier óptico [21]. El principio del efecto Vernier se basa en la amplificación de sensibilidad al medir el desplazamiento de los picos de interferencia cuando dos sistemas ópticos con rango de espectro libre (FSR) diferentes se combinan. Esta combinación crea una *envolvente* en el patrón de interferencia, amplificando la sensibilidad a cambios en los parámetros del sistema, cuando se mide el desplazamiento de esta envolvente, incluso una pequeña variación en el índice de refracción o en la longitud de las cavidades produce un desplazamiento notable en el patrón de interferencia total lo cual hace a este tipo de filtros ópticos una opción ideal para la sintonización del sistema.



**Figura 10.** Diagrama de interferómetro [21].

La ecuación para el FSR se escribe de la siguiente manera:

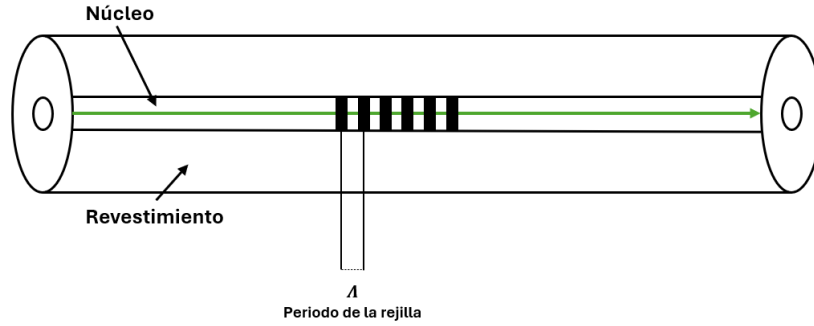
$$FSR = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff}^i L} \quad (6)$$

Al usar dos cavidades ópticas (o interferómetros) con FSR diferentes la combinación de sus respuestas produce un patrón de interferencia modulado por la diferencia entre los dos FSR. Este patrón de interferencia o envolvente tiene un período efectivo mayor lo cual aumenta la sensibilidad a variaciones en la longitud de onda o frecuencia.

$$P_V = \frac{FSR_1 \cdot FSR_2}{|FSR_1 - FSR_2|} \quad (7)$$

La **figura 10** muestra el diagrama de construcción para el filtro óptico, donde se puede observar la estructura de las dos fibras FMF concatenadas a la fibra SMF-28. La longitud de separación entre las fibras **L** resulta ser inversamente proporcional al FSR para el sistema formado, por lo que la correcta elección de este tipo de filtro se debe basar en esta longitud de separación considerando el rango de longitudes de onda al cual se modificara el sistema láser.

Las rejillas de periodo largo (RPL) modifican la propagación de ciertas longitudes de onda generando una atenuación en bandas de longitud de onda específicas, esto resulta ser de gran utilidad si se necesita un filtro en algún sistema óptico [22]. El hecho de introducir una rejilla de periodo largo en la cavidad puede cambiar las longitudes de onda de emisión al introducir una modulación espectral en la propagación de la luz, al ajustar el período de la rejilla o al cambiar las condiciones externas (como la temperatura o la tensión aplicada a la fibra), es posible controlar de manera dinámica la longitud de onda central en la que ocurre la atenuación [23].



**Figura 11.** Diagrama de RPL.

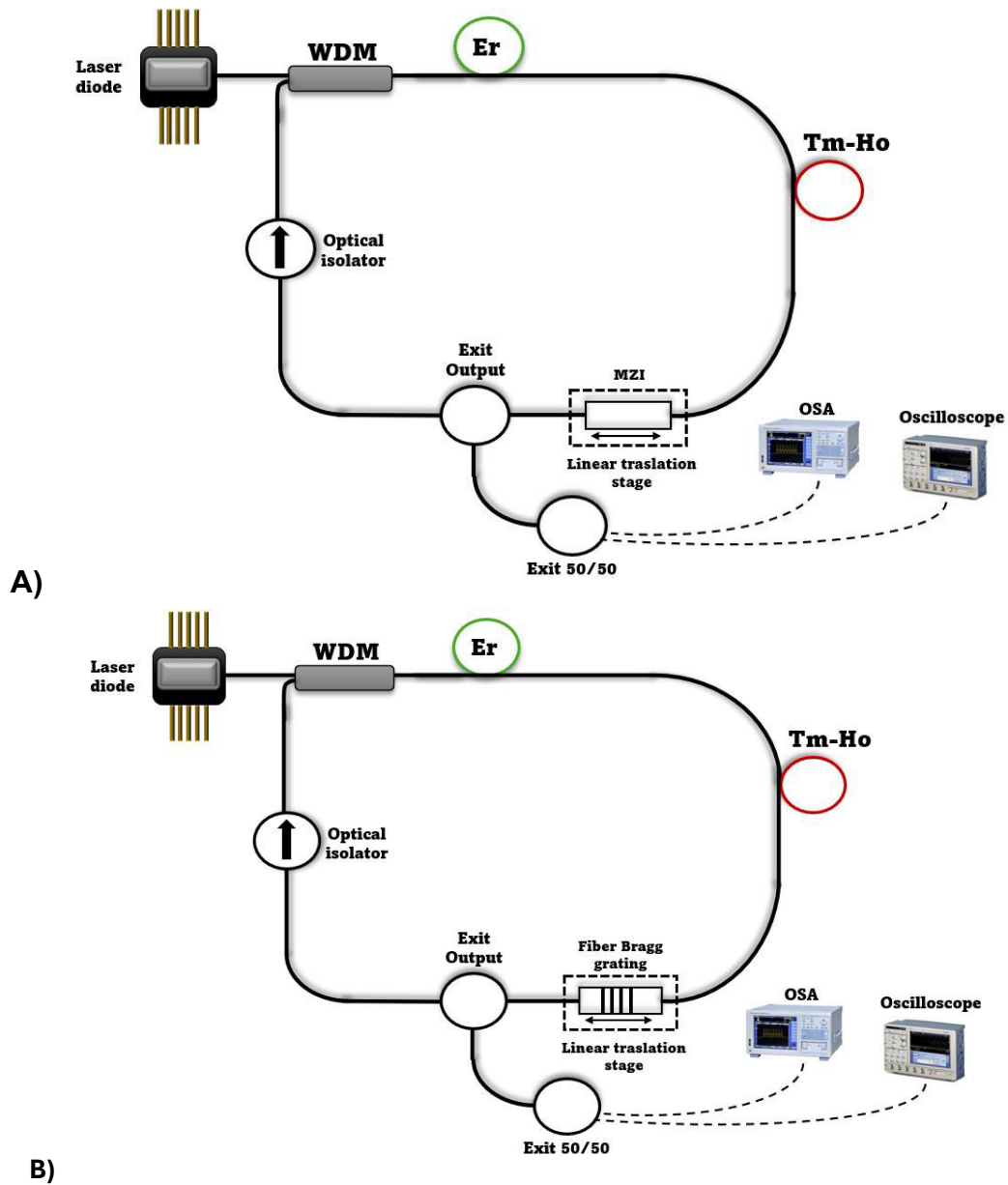
La máxima atenuación de longitud de onda en una RPL se le conoce como longitud de onda de resonancia y es dependiente de los índices de refracción efectivos en el núcleo y en el revestimiento, así como también del periodo de separación entre la modulación del índice de refracción en el núcleo [24].

$$\lambda_{res} = \Lambda(n_{core} - n_{cladding}) \quad (8)$$

### 3.2. Materiales y métodos.

El diodo láser “QFBGLD-980-500” fue el utilizado para el bombeo a 980 nm hacia la fibra óptica dopada con Erblio a la cual se realizó un empalme de fibra óptica SMF-28 unimodal, la siguiente etapa de fibra óptica incluye el absorbedor saturable de Tulio-Holmio que mediante el bombeo continuo de fotones a 1550 nm provenientes del Erblio excitarán los niveles energéticos del absorbedor saturable siguiendo el diagrama observado en la sección 1.3.

La integración del filtro óptico posterior al absorbedor saturable se realizó en dos diferentes montajes:

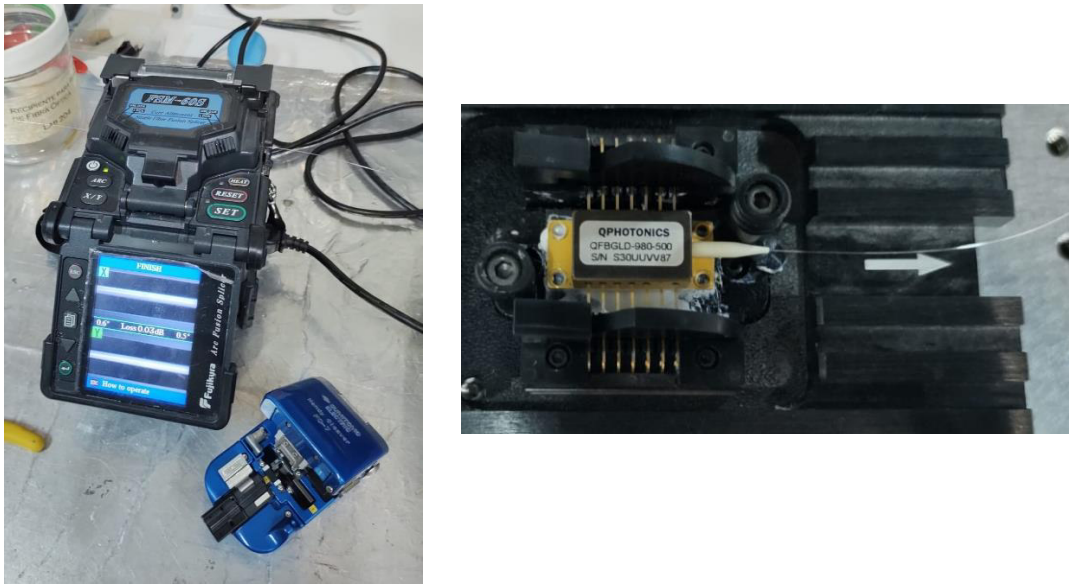


**Figura 12.** Diagrama de sistema láser.

**Diagrama A:** El montaje de este sistema incluye como filtro óptico un interferómetro Mach-Zehnder basado en fibras de pocos modos con una longitud de separación de 40 cm. La elección de este filtro se realizó mediante la prueba de diversos interferómetros ( $L$  diferentes desde 50-10 cm) analizando la salida de cada uno en el sistema tal que la sintonización se encuentre en el rango de las bandas de absorción del gas acetileno. Su análisis de resultados finales se mostrará más adelante.

**Diagrama B:** El montaje de este sistema incluye como filtro óptico una RPL modelo 980 HP con un periodo de 500 micras.

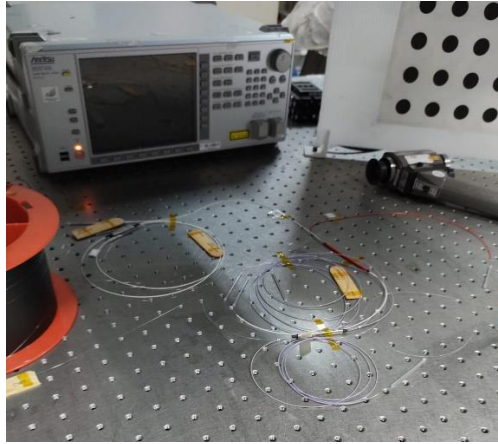
Se debe destacar que para **ambos** filtros ópticos se harán modulaciones en su arquitectura externa mediante una montura milimétrica donde se observarán los desplazamientos del espectro.



*Figura 13. Empalmadora y diodo utilizado para bombeo.*

Posteriormente se integró el circulador óptico hacia dos etapas:

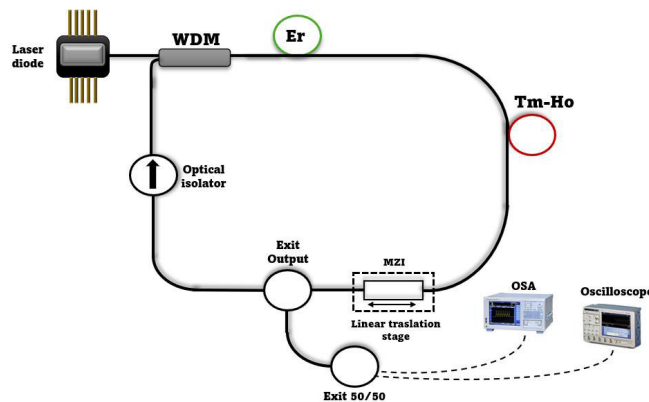
- La primera se encargará de ir hacia la salida del sistema en el cual se integra un divisor 50/50 con señal en dirección de un analizador de espectro óptico de la marca “Yokogawa AQ6370B” en un rango de 1500 nm a 1600 nm con el cual se analizará el espectro de longitudes de onda y un fotodetector “New Focus 2053” con el cual el tren de pulsos Q-switching será observado mediante un osciloscopio “Tektronix DPO 7054”.
- La segunda etapa (de retroalimentación) guiará la luz hacia el aislador óptico y finalmente al WDM para continuar el proceso de retroalimentación.



*Figura 14. Etapa de aislador y WDM para cavidad de anillo.*

### 3.2.1. Experimento 1. Caracterización con filtro óptico MZI 40 cm.

Este experimento se realizó mediante el montaje del **diagrama A** (figura 11) mostrado en la sección 3.2.



*Figura 15. Diagrama A de láser.*

Se debe destacar que la modulación del interferómetro M-Z en este caso específico no fue modulado periódicamente, sino que se realizó un montaje fijo observando los cambios del espectro en el analizador de espectro óptico. Esto se realizó de esta manera debido a la sensibilidad del sistema ante una modulación del interferómetro que afectaba directamente a los resultados obtenidos.

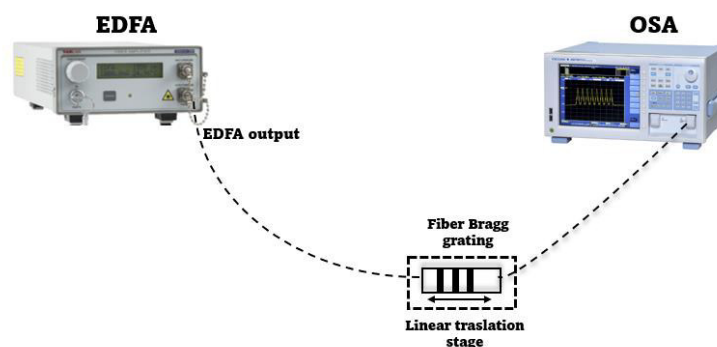
La caracterización de este sistema se realizará con un aumento progresivo de la corriente en el diodo, esto a partir de que no haya ninguna emisión láser ni ningún pulso observado en el osciloscopio. Una vez llegado al umbral se comenzará la

toma de datos del analizador de espectro y osciloscopio, los cuales posteriormente serán tratados para su análisis y frecuencia teniendo ya una primera aproximación con las secuencias de pulsos de la simulación.

### 3.2.2. Experimento 2. Caracterización rejilla de periodo largo.

Para este segundo experimento el objetivo a seguir era el realizar el montaje mediante el **diagrama B (figura 12)**. Esto significaba modificar el montaje añadiendo ahora como filtro óptico a una rejilla de periodo largo.

Antes de realizar este montaje previamente se realizó una caracterización de la rejilla individual con ayuda de un amplificador de fibra dopada con Erbio (EDFA) se procedió a la caracterización de la rejilla individualmente, a esto también se le agrega una modulación de la rejilla mediante una montura milimétrica, esta montura es la “Newport 423 series” con un tamaño de paso de 0.5 mm y máximo recorrido de 25 mm. La modulación se realizó con la rejilla sin ninguna perturbación (0 mm) inicialmente, posteriormente a un paso de 0.1 mm se modificó su estructura llegando a un máximo de 2 mm.



**Figura 16.** Montaje para caracterización de RPL.

Esta caracterización se realizó para tener un entendimiento de sus características y sobre todo el desplazamiento de la longitud de onda en función a la modulación de sus características externas.

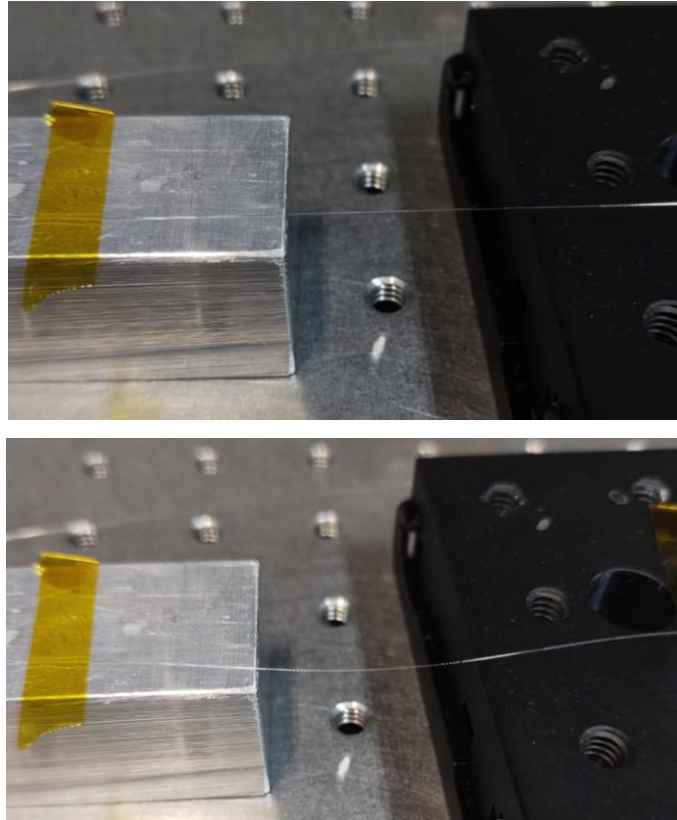


**Figura 17.** Montura Newport 423 series utilizada para alterar las características ópticas de la rejilla de periodo largo [25].

### **3.2.3. Experimento 3. Caracterización con rejilla de periodo largo en sistema láser.**

Una vez analizados los datos de los cambios en el espectro en función de la tensión aplicada a la fibra se procedió con el montaje del **diagrama B**, en este sistema la tensión es modulada mediante la misma montura de desplazamiento donde se coloca la fibra óptica tensa tal que mediante un ajuste milimétrico se realice una perturbación en la tensión de la fibra modificando sus propiedades ópticas. La fibra óptica se colocó sobre la montura de manera que quede sin ninguna perturbación en su estructura, esto se realiza para observar las propiedades características de la fibra, posteriormente a un paso de 0.5 mm se modifica la estructura de la rejilla observando los posibles cambios en la emisión láser y los pulsos emitidos por efecto Q-switch.





**Figura 18.** *Perturbación de tensión en rejilla de Bragg.*

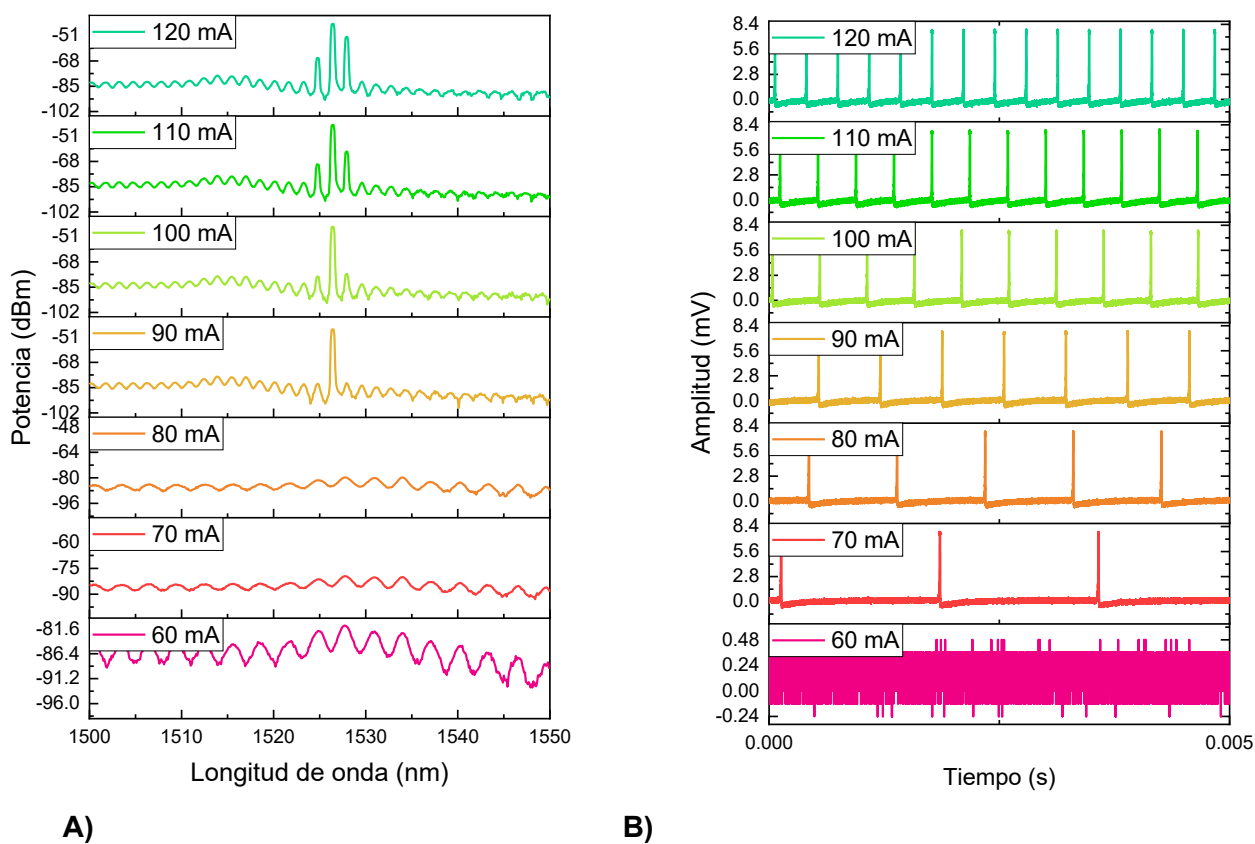
La caracterización del sistema se realizará de igual manera al “experimento 1” a partir del umbral de emisión láser en el cual se logren observar los pulsos continuos, una vez que se obtiene el umbral, el siguiente paso es el de la toma continua de datos para los diferentes desplazamientos de la montura, que por consiguiente modifican los máximos de emisión láser en el sistema y el comportamiento de los pulsos continuos. Cada una de las modificaciones se registrará y analizará dando importancia a los espectros de emisión en el cual el objetivo de este trabajo sea obtenido.

## **4. Resultados**

### **4.1. Experimento 1. Caracterización con filtro óptico MZI 40 cm.**

Como fue mencionado previamente en la sección 3.2.1, la caracterización del filtro óptico MZI se realizó primeramente identificando el umbral de emisión láser, este

umbral se encontró en 70 mA (aproximadamente 40.8 mW de potencia disponible según datos del fabricante). La caracterización se realizó tomando datos con un paso de 10 mA hasta una corriente de 120 mA y se analiza el comportamiento tanto en longitud de onda como del régimen temporal de las emisiones láser y también la potencia de salida. El régimen temporal se hace mediante el fotodetector y osciloscopio, mientras que el análisis espectral con la ayuda de un analizador de espectro (OSA).

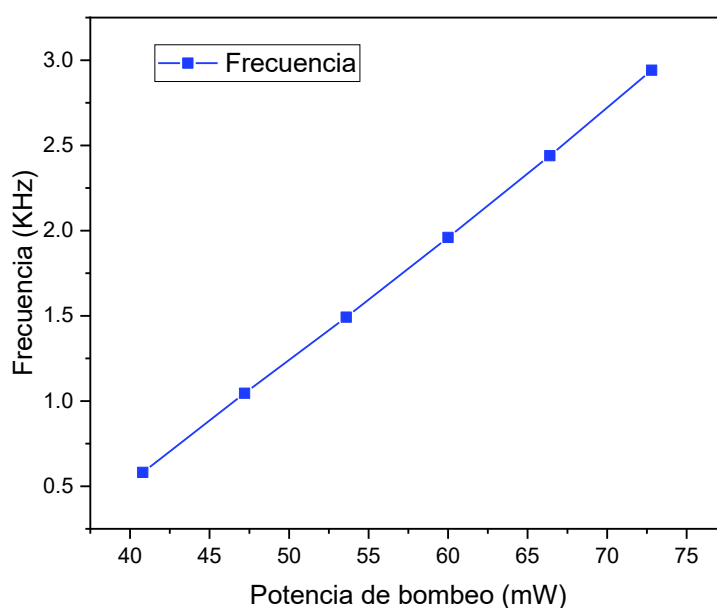


**Figura 19.** Caracterización experimento 1. **A)** Espectro óptico con variación de corriente. **B)** Secuencias de pulsos

La **figura 19** nos muestra el comportamiento del sistema ante un aumento de corriente del diodo, el análisis espectral muestra el aumento de los máximos de emisión láser donde aumentan como función de la corriente y destacando la multi longitud del sistema. El rango en el cual está emitiendo es aproximadamente de 1520 a 1530 nm, este rango es de vital importancia para este trabajo de tesis debido a que el rango de emisión está dentro de las líneas de absorción del acetileno en la

p-branch haciendo al montaje del diagrama A un sistema idóneo para la espectroscopia del acetileno.

El régimen temporal medido con el osciloscopio muestra los pulsos debido al efecto Q-switch por el absorbedor saturable de Tm-Ho. Ante un aumento de la corriente esta secuencia de pulsos se ve afectada aumentando la frecuencia de emisión, analizando los datos se graficó esta frecuencia en función de la potencia incidente aproximada según los datos del fabricante.



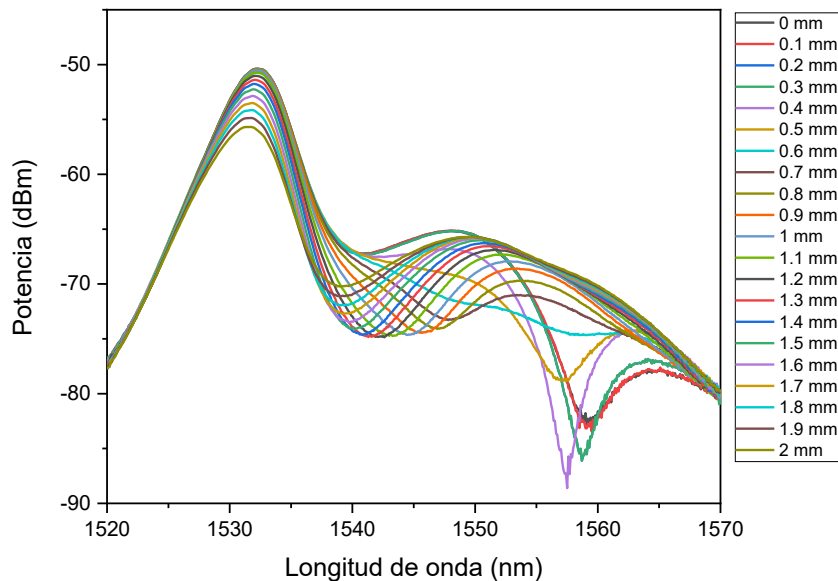
**Figura 20.** *Gráfico de potencia vs frecuencia de pulsos.*

Podemos visualizar que la frecuencia varía de 0.5 KHz a 3 KHz cuando se suministra bombeo de 40 mW a 73 mW (**figura 20**). Cabe destacar en este gráfico la comparación con la **figura 6** debido a que la primera aproximación de resultados mostraba un aumento de la frecuencia en función de la potencia, demostrando lo poderoso que resultan ser las herramientas de simulación en la realización de experimentos.

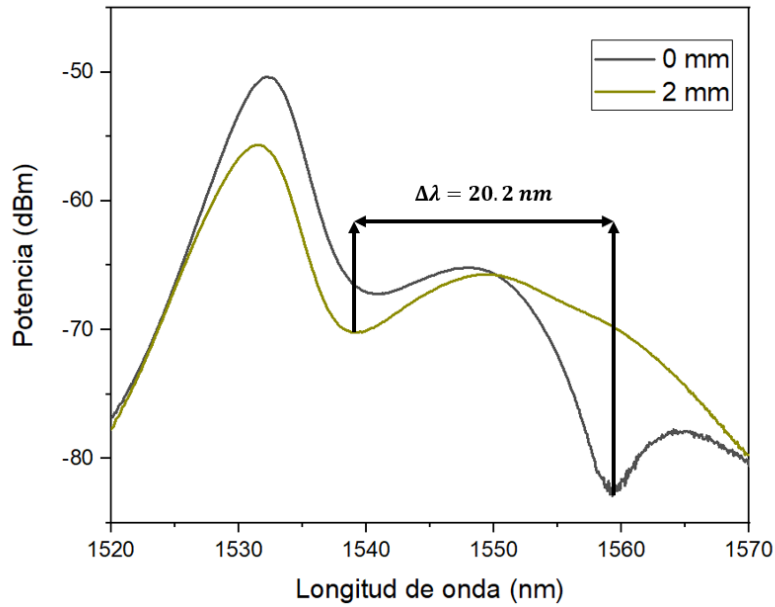
## 4.2. Experimento 2. Caracterización rejilla de periodo largo.

Un método análogo para realizar la sintonización de un sistema láser es mediante una rejilla de periodo largo. Sus características fueron mencionadas previamente y en este trabajo se utilizó una con el objetivo de realizar esta sintonización más fina y analizar las diferencias a lo realizado con el MZI del experimento 1.

Antes de realizar el montaje de la rejilla en el sistema se caracterizó con un amplificador de fibra de Erbio. El objetivo principal radica en observar cómo el espectro se desplaza en función de una modulación externa en su arquitectura que afecta a las propiedades ópticas de la rejilla.

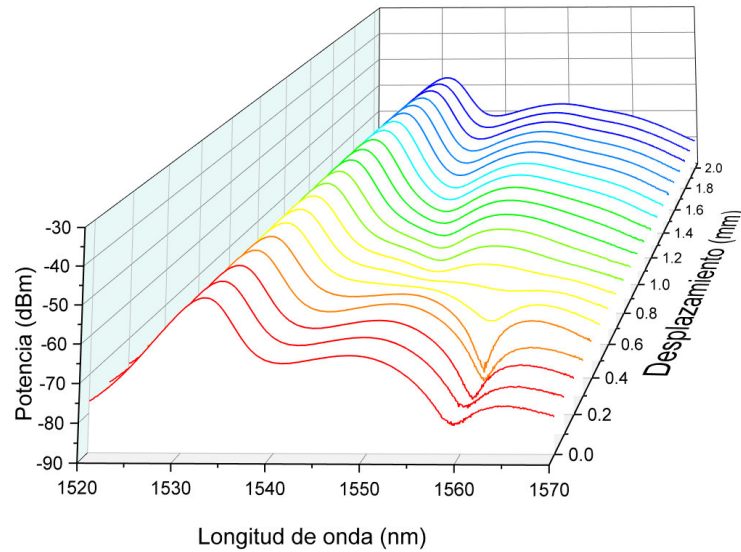


**Figura 21.** Gráfico de espectro óptico ante cada desplazamiento de la rejilla.



**Figura 22.** Desplazamiento de rejilla.

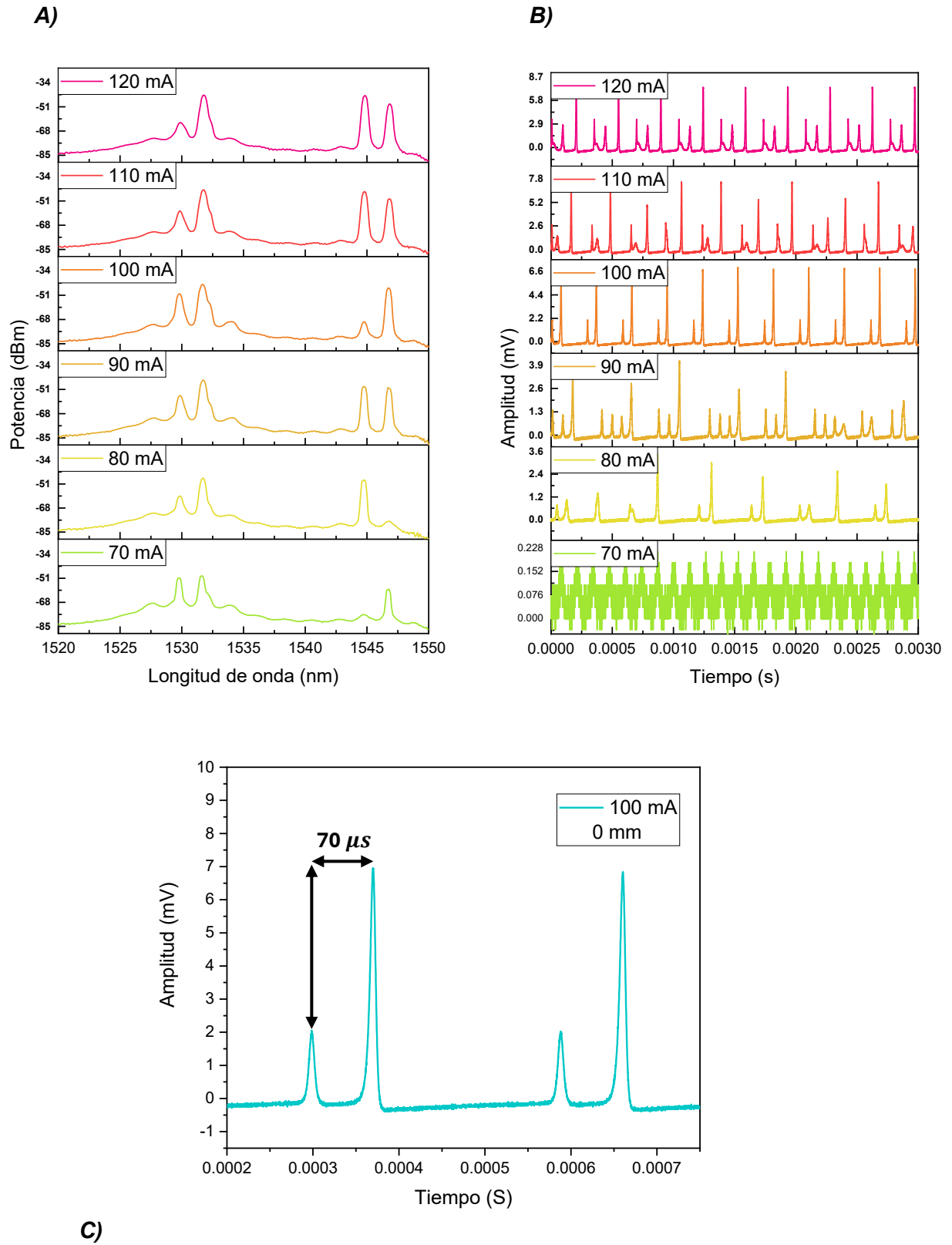
La **figura 21-23** muestra cómo ante las perturbaciones de su estructura el rango de la longitud de onda reflejada varía dependiendo de esto. El hecho de que este rango sea variable da una primera aproximación a lo que podría suceder en el sistema láser. Recordando, el objetivo es tener una mejor sintonización del sistema en el rango de las bandas de absorción del acetileno, debido a esto el hecho de tener controlada esta sintonización permite que el sistema pueda ser controlado externamente por el usuario modificando las condiciones de máximos de emisión a favor del análisis multi longitud de onda en espectroscopia.



*Figura 23. Gráfico de espectro óptico ante cada desplazamiento de la rejilla.*

### 4.3. Experimento 3. Caracterización con rejilla de periodo largo en sistema láser.

Realizando el mismo método experimental del experimento 1, llegando al umbral de emisión láser en el sistema, como fue mencionado anteriormente según las primeras pruebas se encuentra en 70 mA (aproximadamente 40 mW según datos del fabricante), se tomaron datos con un paso de 10 mA hasta una corriente de 120 mA analizando el comportamiento de las emisiones y las potencias de salida.

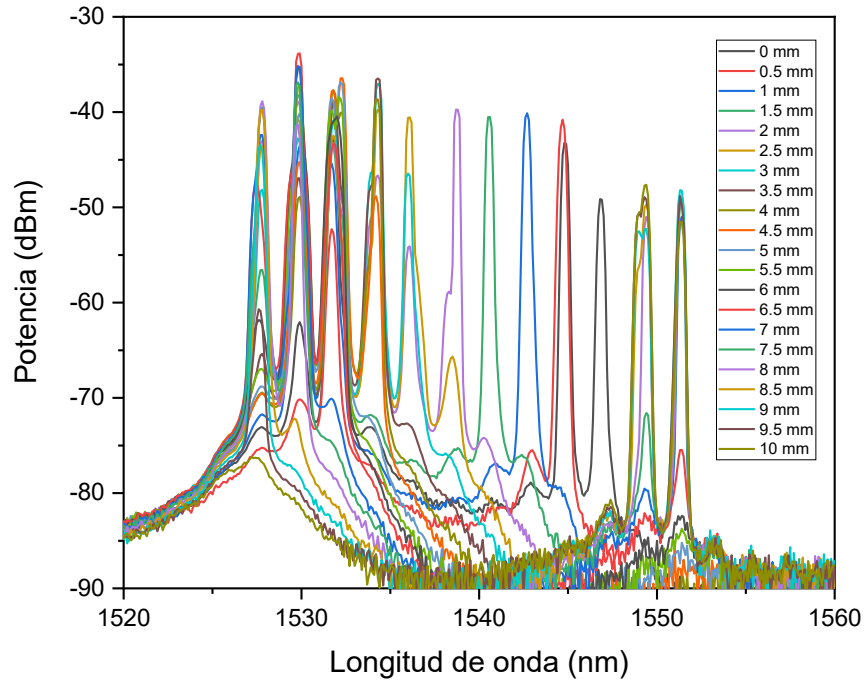
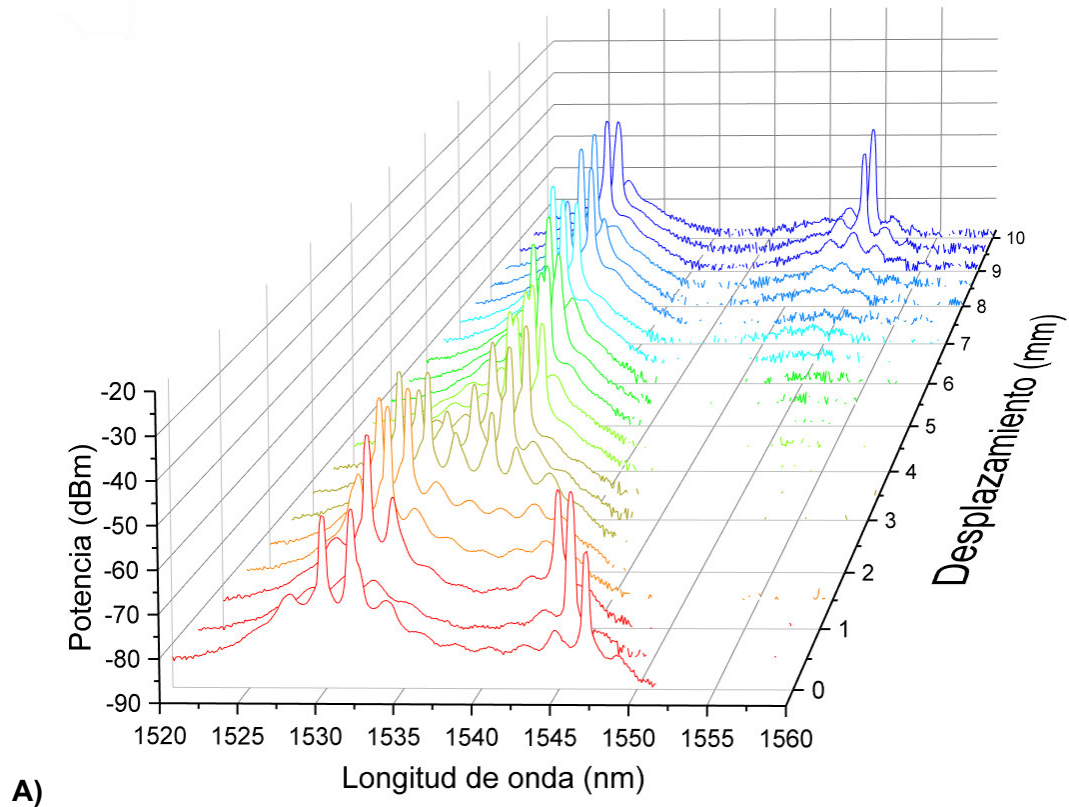


**Figura 24.** Características del sistema láser: **A)** Espectro óptico con variación de corriente. **B)** Secuencia de pulsos correspondiente. **C)** Intervalo de dos pulsos a 100 mA (60 mW).

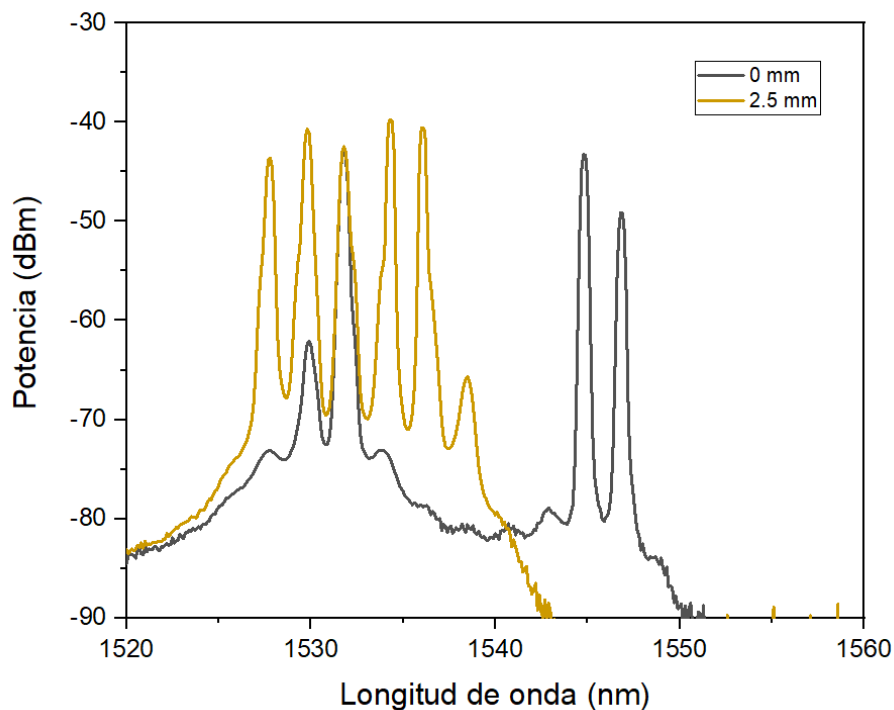
Estas primeras mediciones fueron realizadas sin realizar un cambio en la estructura de la rejilla de periodo largo, posteriormente se hará este análisis. Como se puede observar en la **figura 24 A y B**, se realizó un gráfico para cada espectro óptico con su respectiva secuencia de pulsos, en el analizador de espectro óptico los máximos de emisión láser se encuentran el rango de 1520 a 1550 nm, dando pie a la obtención de un láser multi longitud de onda, de igual manera el gráfico del osciloscopio muestra los pulsos del sistema siendo bien identificables cada pulso. La obtención de estos resultados da pie a la confirmación de la necesidad de sintonizar el sistema de una manera más fina, esta misma se obtiene mediante la modulación de la rejilla de periodo largo. Como fue observado en el experimento 2, el hecho de realizar una modulación en la estructura afecta directamente al espectro óptico de salida, si se tiene un sistema láser multi longitud de onda (ya implementado en la rejilla) podremos modificar los máximos de emisión láser de tal manera que el rango este dentro de las bandas de absorción del acetileno. La **figura 24 C** muestra la secuencia de pulsos de manera más detallada con dos pulsos que son emitidos ante una corriente de 100 mA incidente en el sistema y una separación de 70  $\mu s$  entre cada pulso.

La siguiente caracterización del sistema para el experimento 2 se realizó con el sistema a las mismas condiciones de corrientes, pero en esta ocasión se cambiarán las propiedades ópticas de la rejilla de periodo largo mediante la **modulación de arquitectura** con el fin de obtener una sintonización más fina aproximando el rango de emisión a longitudes de onda más cortas de 1550 nm. Se espera que con el uso de este tipo de rejillas el rango de emisión sea mucho más controlable y los pulsos del sistema cambien dependiendo de las propiedades de la rejilla y la potencia incidente al sistema.



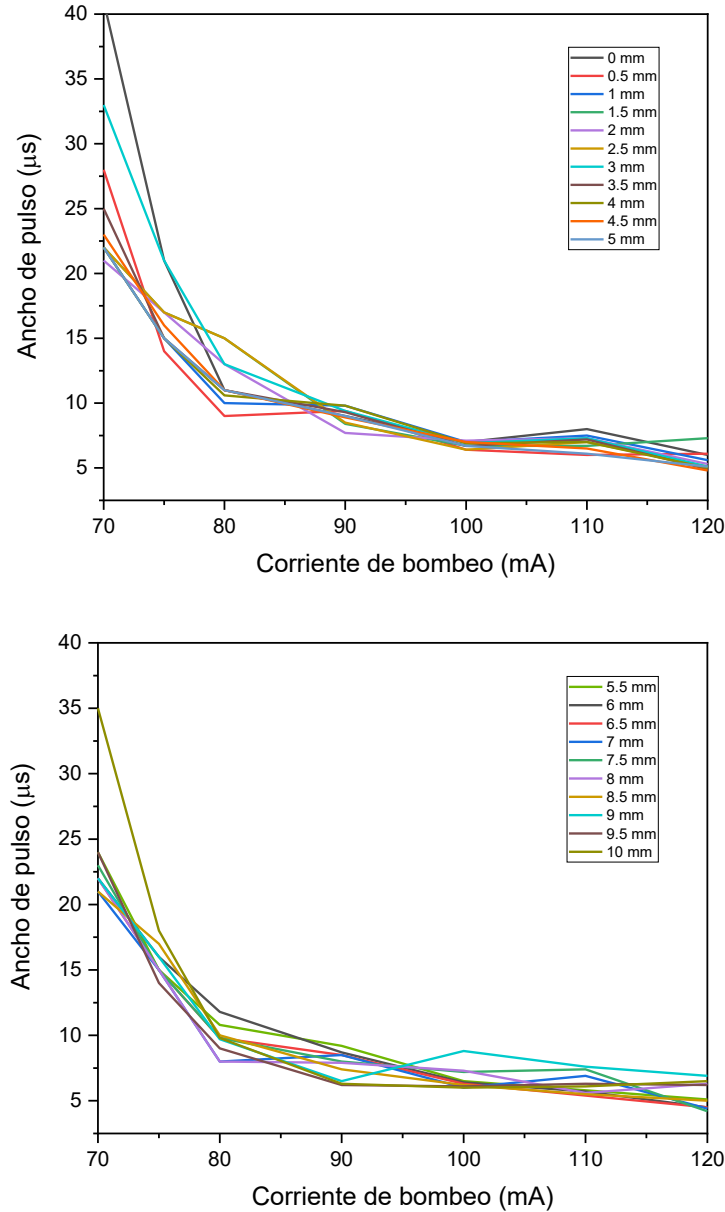


**Figura 25.** Espectro óptico con alteración a la rejilla cada 0.5 mm. A) Barrido de longitudes de onda a 70 mA. B) Barrido en dos dimensiones del rango a 120 mA.



**Figura 26.** Comparación a 0 mm y 2.5 mm de desplazamiento a 120 mA.

El espectro óptico observado en la **figura 25 A y B** muestra los máximos de emisión láser en el umbral de 70 mA y 120 mA. Como fue mencionado anteriormente, realizando cambios en la tensión de la rejilla se atenúan ciertas longitudes de onda propiciado al sistema a emitir en otro rango más útil a los objetivos de este trabajo. Es interesante observar cómo los pequeños cambios en la rejilla han propiciado que aumenten o disminuyan estos máximos (**figura 26**), de igual manera se debe tomar en cuenta que la sensibilidad de esto resulta ser alta por lo que cada uno de los cambios realizados debió hacerse con cuidado para lograr resultados repetitivos. Los pulsos obtenidos en el osciloscopio se analizaron obteniendo su ancho dependiendo de la corriente incidente al sistema en donde se puede observar cómo este ancho disminuye considerablemente al aumento de la corriente.



**Figura 27.** Ancho de pulsos dependiente de la corriente incidente y desplazamiento.

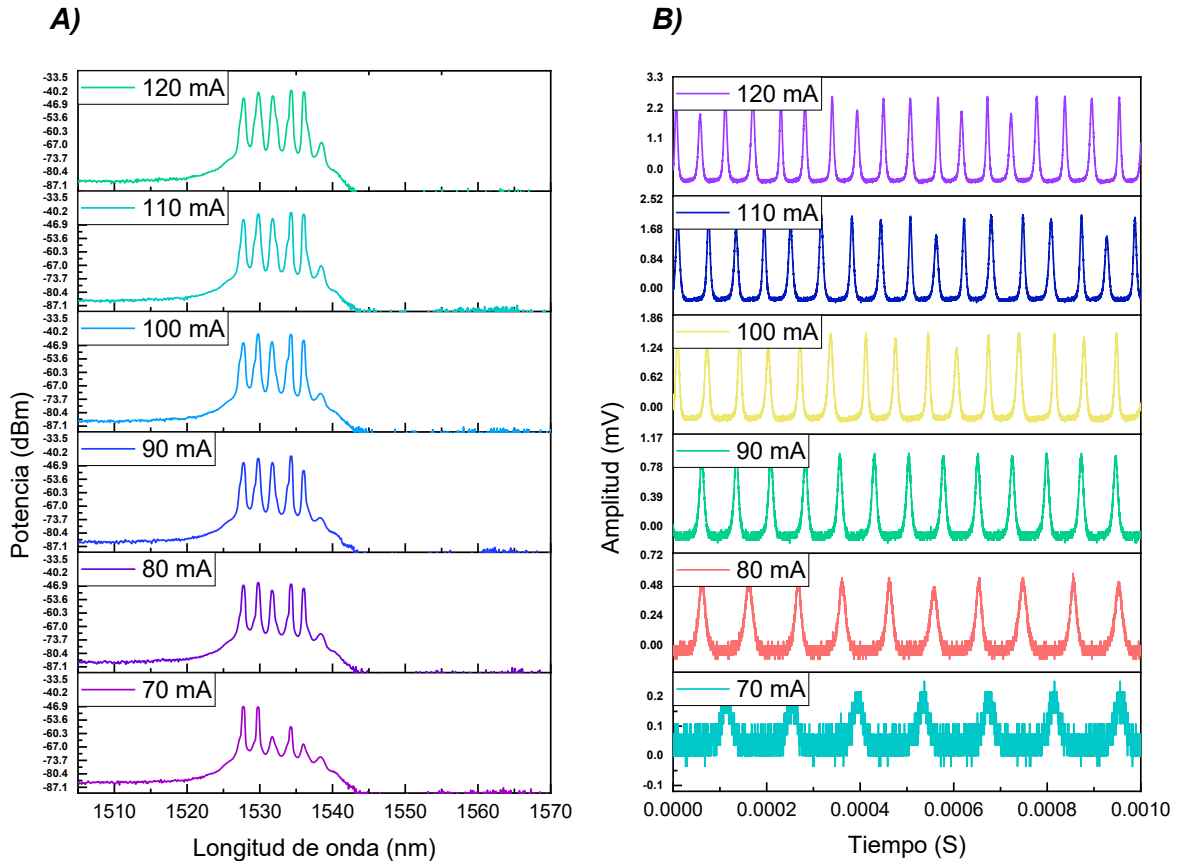
La **figura 27** muestra el gráfico del ancho de pulsos en función de la corriente de bombeo. Cuando se inyecta más potencia en la fibra dopada con erbio aumenta la población de iones en los estados de energía excitados, esto genera una mayor ganancia óptica en la fibra. Con una ganancia más alta, el umbral de saturación se alcanza más rápidamente en el absorbente saturable (de tulio-holmio en este caso), lo que permite una liberación más rápida de la energía almacenada en forma de pulsos más cortos.

Los cambios en el espectro óptico del umbral a partir del cambio en la tensión de la rejilla se analizaron en función del número de emisiones y potencia promedio obtenidos

Desplazamiento (mm)	Número de líneas de emisión	Potencia promedio (dBm)
0	3	-52.3
0.5	1	-51.5
1	3	-53
1.5	2	-52
2	2	-47
2.5	5	-56
3	4	-55
3.5	2	-48
4	3	-49.3
4.5	2	-47
5	3	-53
5.5	2	-46.5
6	1	-43.9
6.5	1	-43.7
7	2	-51
7.5	2	-48.5
8	2	-53
8.5	1	-43.6
9	1	-44.1
9.5	2	-53.5
10	1	-55.8

**Tabla 2.** *Análisis de espectro óptico con una variación de 2.5 mm en la rejilla.*

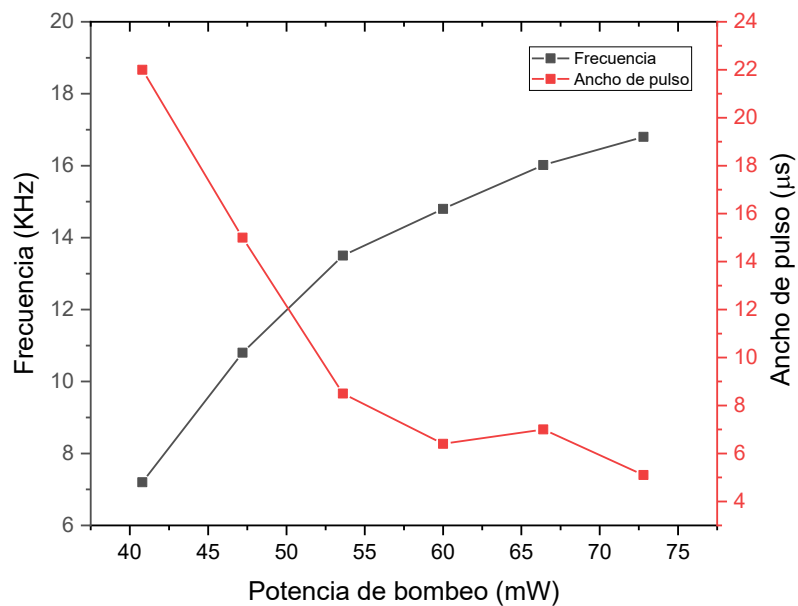
A partir del desarrollo de esta tabla se tomó en cuenta el efecto de las emisiones a 2.5 mm para el cambio en la rejilla debido a que se obtiene un máximo de hasta 5 líneas de emisión en el analizador de espectro óptico con un rango de longitudes de onda en la rama P del acetileno cumpliendo con el objetivo establecido. La caracterización de este rango se realizó mediante el ajuste cuidadoso de la montura y siguiendo las mismas corrientes y tamaño de paso de la caracterización del umbral observando los espectros característicos en el analizador de espectro y las secuencias de pulsos en el osciloscopio.



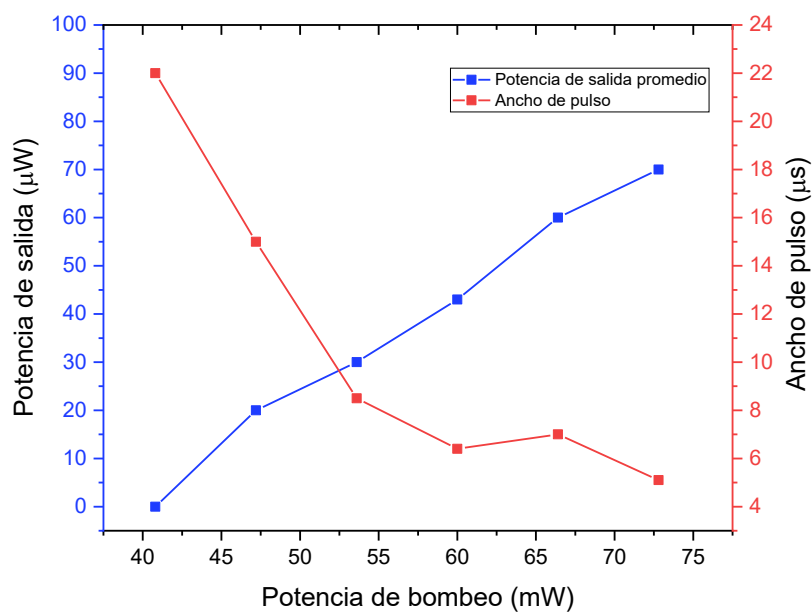
**Figura 28.** A) Espectro óptico a diferentes corrientes con un desplazamiento en la rejilla de 2.5 mm  
B) Pulsos a diferentes corrientes incidentes a un desplazamiento fijo de rejilla a 2.5 mm.

La **figura 28** muestra la caracterización del sistema a una modulación en la rejilla de 2.5 mm, esta modulación muestra como la sintonización más fina del sistema permite lograr máximos de emisión láser en un diferente rango. Realizando un análisis con ayuda de la **figura 7** podemos identificar las líneas de absorción correspondientes al rango de emisión. Al igual que en el experimento 1 la p-branch resulta ser la más ideal para el estudio con este sistema láser, aunque considerando el rango que se maneja con la RPL hay un nuevo régimen de líneas de absorción para el experimento 2. De igual manera a como se observó en el experimento 1 la frecuencia de la secuencia de pulsos tiene un aumento en función de la potencia incidida en el diodo, la **figura 29** muestra como el ancho de pulso disminuye ante un aumento de la potencia en el sistema, mientras que la frecuencia y potencia de salida aumenta, esto es interesante de observar considerando que en este sistema

se están generando pulsos con potencia creciente ideales para la aplicación en espectroscopia.



A)



B)

**Figura 29.** A) Ancho y frecuencia de pulsos en función de potencia de bombeo.  
B) Potencia de salida y variación de ancho de pulso en función de potencia de bombeo.

Recopilando los resultados obtenidos en este trabajo de tesis se realizo una comparación a otro tipo de láseres de caracterisitcas similares, la mayoría de ellas con menos de dos años de su publicación.

Referencia	Filtro óptico	Régimen	Frecuencia de pulsos	Rango de operación (nm)
Este trabajo	Efecto Vernier óptico y FBG	Pulsado (Q-switch)	$> 16$ KHz	1520-1540
Ref. [26]	Efecto Vernier óptico	Continuous wave (CW)	N/A	1540-1560
Ref. [27]	Efecto Vernier óptico	CW	N/A	1520-1540
Ref. [28]	FBG	Mode-locked/ Q-switch	$> 18$ MHz	Emision a 1543.7
Ref. [29]	EOM and parallel Lyot filters]	Q-switch	$\approx 10$ KHz	1550-1560
Ref. [30]	Efecto Vernier óptico	CW	N/A	1540-1560
Ref. [31]	Efecto Vernier óptico	CW	N/A	1540-1560
Ref. [32]	Cristal compuesto	CW	$> 100$ KHz	$> 1550$

**Tabla 3.** Comparativa con artículos similares publicados en años recientes.

## 5. Discusión

En comparación con otro tipo de sistemas láser en los cuales de igual manera se han utilizado componentes de sintonización para un láser con fibra dopada de Erblio, este trabajo de tesis demuestra la construcción y funcionamiento de un láser **Q-switch pulsado multi longitud de onda sintonizable** como fuente de bombeo generando luz en el mediano infrarrojo, junto con sus potenciales aplicaciones, tales como la espectroscopia del gas acetileno a través de la emisión en sus bandas de absorción, así como su posible uso en telecomunicaciones de larga distancia. Debemos destacar que el rango de operación (**1520-1540 nm**) en este trabajo de tesis bajo los métodos de sintonización presentados está a la vanguardia de artículos científicos publicados en **2024**, siendo este el primero en operación con dos métodos de sintonización comprobables experimentalmente.

Las condiciones operativas del sistema permiten, mediante la modulación de las características ópticas de un **interferómetro March-Zehnder basado en fibras de pocos modos** (efecto Vernier óptico) o una **rejilla de Bragg de periodo largo**, obtener una sintonización precisa del sistema hacia diferentes rangos de emisión, lo que habilita la exploración de diversas líneas de absorción en la rama P del espectro del gas acetileno.

Los principales retos que afrontar en este trabajo fueron el rango en el cual se trabaja en este tipo de sistemas láser, la sintonización de cada pulso emitido al ser un láser multi longitud de onda cada cambio en las propiedades ópticas de la fibra conllevan a resultados diferentes en pro y contra del objetivo principal, por lo cual el uso de componentes como fue mencionado anteriormente, son de una gran utilidad para una sintonización fina, además de ayudar en el proceso de amplificación en el rango deseado.

La construcción y demostración de este láser mediante una primera aproximación simulada permite explorar un rango del infrarrojo medio con múltiples aplicaciones y ramas de investigación crecientes además de la espectroscopia en otro tipo de gases que se encuentren en este rango del espectro electromagnético.



La **tabla 3** presenta una comparación con otros sistemas láser que emplean distintos filtros ópticos para la sintonización del sistema. Como se mencionó previamente, este trabajo de tesis aborda un rango de longitudes de onda que no ha sido explorado en publicaciones recientes. Dicho rango pertenece a las bandas de absorción del acetileno, lo que posiciona a este láser como una herramienta idónea tanto para su uso como etapa de bombeo en espectroscopia infrarroja como para la generación de luz mediante la excitación de sus niveles de energía.

El método de sintonización implementado en este trabajo, basado en el principio de Vernier óptico, se distingue por su innovación en comparación con referencias previas. En particular, el sistema opera en régimen pulsado, alcanzando frecuencias de hasta 3 kHz. Este desempeño, en función de la potencia de entrada, representa una ventaja significativa para futuras mejoras en sistemas láser que busquen operar con mayores potencias incidentes. Estas mejoras no solo permitirían incrementar la frecuencia de amplitud láser, sino también explorar un rango más amplio de longitudes de onda.

Además, la utilización de una rejilla de período largo ha facilitado la emisión de más de tres líneas espectrales. Este comportamiento, en comparación con otras referencias citadas en la **tabla 3**, es único en sistemas con un rango de emisión inferior a 1550 nm a nivel mundial.

En términos generales las áreas de mejora en este sistema radican en la potencia de emisión, la cual mediante amplificadores de fibra óptica dopada con Erblio se puede realizar una amplificación de la luz, el tener un sistema bien caracterizado permite que se pueda suprimir la etapa de división de luz hacia el osciloscopio y analizador de espectro dejando una salida única con la cual además de amplificar la potencia se podría ampliar las aplicaciones que se requieran del sistema.

## 6. Conclusión

- Se ha demostrado la construcción y operación de un láser pulsado multi-longitud de onda, consolidándose como un sistema láser ideal para la generación de luz en el rango del medio infrarrojo y aplicaciones de espectroscopia.
- A través de la implementación de filtros ópticos basados en el efecto Vernier óptico y la utilización de rejillas de período largo, se logró una sintonización precisa del sistema en el rango de las bandas de absorción del gas acetileno. Este enfoque no solo optimiza la eficiencia del láser, sino que abre nuevas posibilidades para la exploración de propiedades espectroscópicas en el infrarrojo.
- Este trabajo se sitúa a la vanguardia de la investigación científica internacional, destacando las comparaciones entre artículos más relevantes publicados en los últimos años. El sistema propuesto es único en términos de su método de sintonización mediante filtro óptico, su régimen pulsado y el rango de longitudes de onda abarcando hasta 5 máximos de emisión láser a una modulación individual en una rejilla de periodo largo y además un barrido completo de emisiones a longitudes de onda entre 1520 y 1560 nm mediante estas modulaciones, lo que lo convierte en una contribución de alto impacto en la óptica y física de láseres.
- Las principales áreas de mejora identificadas en el sistema permitirán una evolución sustancial en la aplicación de estos láseres, con un potencial de expansión hacia rangos de longitud de onda previamente inexplorados (<1550 nm). Estas mejoras posicionan al sistema como una plataforma clave para investigaciones futuras.

## 7. Referencias

1. [1] Siegman, A. E. (1990). *Lasers* (1990th ed.). University Science Books.
2. *Radiaciones electromagnéticas*. (n.d.). Cientec.or.cr. Retrieved November 11, 2024, from <https://www.cientec.or.cr/articulos/radiaciones-electromagneticas>
3. Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2013). *Fundamentals of Photonics* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
4. Comisión Internacional de Iluminación. (2020). *ILV: International Lighting Vocabulary* (CIE S 017/E:2020). Comisión Internacional de Iluminación.
5. Delgado-Pinar, M., Zalvidea, D., Diez, A., Perez-Millan, P., & Andres, M. (2006). Q-switching of an all-fiber laser by acousto-optic modulation of a fiber Bragg grating. *Optics Express*, 14(3), 1106. <https://doi.org/10.1364/oe.14.001106>
6. Koechner, W. (2006). *Solid-state laser engineering*. Springer.
7. Anzueto-Sanchez, G., Nunez-Gomez, R. E., Martinez-Rios, A., Camas-Anzueto, J., Castrellon-Urbe, J., & Basurto-Pensado, M. (2017). Highly stable, tapered fiber filter-assisted, multiwavelength Q-switched er-doped fiber laser based on Tm-ho fiber as a saturable absorber. *IEEE Photonics Journal*, 9(6), 1–8. <https://doi.org/10.1109/jphot.2017.2760340>
8. Grynberg, G., Aspect, A., & Fabre, C. (2000). *Optique quantique 1: Lasers* (Vol. 1). Ecole Polytechnique, Département de Physique.
9. Tao, M., Ye, X., Wang, Z., Wu, Y., Wang, P., Yang, P., & Feng, G. (2014). Theoretical modeling and analysis of a passively Q-switched Er-doped fiber laser with Tm-doped fiber saturable absorber. *Optics Communications*, 319, 128–132. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.01.015>
10. Tao, M., Feng, G., Andrianov, A., Kim, A., Yu, T., Zhao, H., & Ye, X. (2015). Tm-Ho codoped fiber based multi-wavelength Q-switching of an Er-doped fiber laser. *Optics Communications*, 354, 209–212. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.05.060>
11. Davis, C. C. (2015). *Lasers and Electro-optics: Fundamentals and Engineering*. Cambridge University Press (Virtual Publishing).

12. Banwell, C. N., & McCash, E. M. (1994). *Fundamentals for molecular spectroscopy* (4th ed.). McGraw-Hill Professional
13. Requena, F. M. (2005). *Espectroscopia*. Pearson Publications Company.
14. Recio del Bosque, F. (2003). *Química organica*. McGraw-Hill Companies.
15. Gilbert, S. and Swann, W. (2001), Acetylene  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  Absorption Reference for 1510 nm to 1540 nm Wavelength Calibration SRM 2517a, Special Publication (NIST SP), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (Accessed November 10, 2024)
16. NIST Office of Data, & Informatics. (n.d.). *Acetylene* [Data set]. National Institute of Standards and Technology.
17. Xu, M., Yu, F., & Knight, J. (2017). Mid-infrared 1 W hollow-core fiber gas laser source. *Optics Letters*, 42(20), 4055. <https://doi.org/10.1364/ol.42.004055>
18. Gonsalves, A. M., Serra, M. E. da S., & Piñeiro, M. (2005). *Espectroscopias vibracional e electrónica*. Imprensa da Universidade de Coimbra.
19. *CorActive Active Single Clad Fibers For Low-Power/High-Efficiency Lasers and amplifiers*. (n.d.).
20. Coldren, L. A., Corzine, S. W., & Mashanovitch, M. L. (2010). *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits: Coldren/Diode Lasers 2E* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
21. Guillen-Ruiz, L. E., Anzueto-Sánchez, G., Martínez-Rios, A., Jiménez-Mares, M. C., & Martin-Vela, J. A. (2024). High-sensitivity displacement sensor using few-mode optical fibers and the Optical Vernier Effect. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 14(20), 9300. <https://doi.org/10.3390/app14209300>
22. Othonos, A., & Kalli, K. (1999). *Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Artech House.
23. Vengsarkar, A. M., Lemaire, P. J., Judkins, J. B., Bhatia, V., Erdogan, T., & Sipe, J. E. (1996). Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *A Joint IEEE [Journal of Lightwave Technology]*, 14(1), 58–65. <https://doi.org/10.1109/50.476137>

24. A. Martinez-Rios, D. Monzon-Hernandez, I. Torres-Gomez, G. Salceda-Delgado, Long period fibre gratings, In Fiber Optic Sensors. InTech 2012.
25. Wikipedia contributors. (2022, June 8). *Linear stage*. Wikipedia, The Free Encyclopedia.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Linear\\_stage&oldid=1092078072](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Linear_stage&oldid=1092078072)
26. Zhang, J., Ren, W., Zhang, L., Ren, G., & Zheng, X. (2024). Wavelength-switchable fiber laser based on Vernier effect formed by two cascaded single mode-few mode-single mode fiber interferometers. *Optical Fiber Technology*, 88(103996), 103996. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2024.103996>
27. Tao, M., Wu, J., Peng, J., Wu, Y., Yang, P., & Ye, X. (2013). Experimental demonstration of an Er-doped fiber ring laser mode-locked with a Tm–Ho co-doped fiber saturable absorber. *Laser Physics*, 23(8), 085102.  
<https://doi.org/10.1088/1054-660x/23/8/085102>
28. Li, Y., Pan, H., You, Q., Li, B., Zhu, Y., Li, R., Chen, C., & Zhao, Z. (2024). *Switchable and wavelength-spaced tunable multi-wavelength actively Q-switched fiber laser based on eom and parallel lyot filters*.  
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4944469>
29. Zhao, Y., Lin, H., Zhou, C., Deng, H., Zhou, A., & Yuan, L. (2019). Cascaded mach–Zehnder interferometers with vernier effect for gas pressure sensing. *IEEE Photonics Technology Letters: A Publication of the IEEE Laser and Electro-Optics Society*, 31(8), 591–594.  
<https://doi.org/10.1109/lpt.2019.2902383>
30. Jiang, X., Chen, Y., Yu, F., Tang, L., Li, M., & He, J.-J. (2014). High-sensitivity optical biosensor based on cascaded Mach-Zehnder interferometer and ring resonator using Vernier effect. *Optics Letters*, 39(22), 6363–6366.  
<https://doi.org/10.1364/OL.39.006363>
31. Liu, Y., Xu, H., Zhu, K., Yao, Y., Suo, Y., & Zhang, L. (2024). Erbium-doped tunable fiber laser based on a vernier effect filter. *Photonics*, 11(10), 979.  
<https://doi.org/10.3390/photonics11100979>

32. Chen, Y., Lin, Y., Huang, J., Gong, X., Luo, Z., & Huang, Y. (2018). Efficient continuous-wave and passively Q-switched pulse laser operations in a diffusion-bonded sapphire/Er:Yb:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>/sapphire composite crystal around 1.55  $\mu\text{m}$ . *Optics Express*, 26(1), 419–427. <https://doi.org/10.1364/OE.26.000419>

## 8. Apéndice A

El código utilizado en la simulación del modelo teórico para el láser Q-switch se muestra a continuación:

```
clear
```

```
clc
```

```
ti = 0;
```

```
tf = 10e-3;
```

```
tspan=[ti tf];
```

```
y0=[0; 0; 0];
```

**%Herramienta ode45 para resolver el sistema numericamente**

```
[t,y] = ode45(@rate_eq,tspan,y0);
```

**%Salida grafica del sistema**

```
figure(1); %Densidad de fotones
```

```
hold on
```

```
title('100 mW')
```

```
plot(t,normalize(y(:,1), 'range'), 'c');
```

```
xlabel('Time');
```

```
ylabel('Density')
```

```
hold off
```

```
figure(2); %Evolucion temporal de poblacion en el Erblio
```

```
hold on
```

```
plot(t,normalize(y(:,2), 'range'));
```

```
xlabel('Time');
```

```
ylabel('N2')
```

```
hold off
```

```
figure(3); %Evolucion temporal de poblacion en el Tulio
```

```
hold on
```

```
plot(t,normalize(y(:,3), 'range'), 'g');
```

```
xlabel('Time');
```

```
ylabel('N5')
```

```
hold off
```

```
function dy = rate_eq(t,y)
```

```
dy = zeros(3,1);
```

```
%Parametros de simulacion
```

```
h = 6.62606957E-34;
```

```
c = 3E8;
```

```
A = 63.6e-12;
```

```
l = 2;
```

```
Ner = 1.81e25;
```

```
sigmaap = 3.1e-25;
```

```
sigmaes_sa = 4.92e-24
```

```
t2 = 0.01;
```

```
R1 = 1;
```

```
lsa = 0.2;
```

```
NTm = 5e25;
```

```

sigmaes = 3.6e-25;
sigmaas_sa = 2.46e-25; %2.46e-25
t5 = 334.7e-6;
R2 = 0.5;
lp = 10;
n = 1.5;
sigmaas = 3.6e-26;
beta = 1e-7;
%Potencia de bombeo (variable para observar diferentes secuencias de pulsos)
Pow = 0.1;
delta = 0.4;
wp = (((980e-9*sigmaap))/(A*h*c))*Pow;
tr = (2*n*(l+lsa+lp))/c;

%Sistema de ecuaciones a resolver con cada parámetro establecido
dy(1) = -(((delta-log(R2))/tr))*(y(1))+y(1)/tr*(sigmaes*y(2)-sigmaas*(Ner-y(2)))+l+(sigmaes_sa*y(3)-sigmaas_sa*(NTm-y(3)))*lsa-(delta-log(R1*R2))+beta*y(2);

dy(2) = wp*(Ner-y(2))-(y(2)/t2)-(c*y(1)*(sigmaes*y(2)-sigmaas*(Ner-y(2))));

dy(3) = -(sigmaes_sa*y(3)-sigmaas_sa*(NTm-y(3)))*c*y(1)-(y(3)/t5);

end

```

Los parámetros de potencia y longitud de las fibras dopadas son variables que el usuario puede modificar observando las diferencias en cada secuencia de pulsos.



UNIVERSIDAD DE  
GUANAJUATO



León Guanajuato, diciembre 2024

Dr. Modesto Sosa Aquino

Director de la división de ciencias e ingenierías, campus león

Universidad de Guanajuato

Estimado Dr. Modesto:

Por medio de la presente le informo que he revisado la tesis **"Laser de fibra óptica multi-longitud de onda como fuente de bombeo para generación de luz en el mediano IR"** escrita por Jesús Eliseo Vazquez Monzón estudiante de la licenciatura en ingeniería física. En mi opinión la tesis esta lista para ser presentada y estoy de acuerdo que se proceda con la defensa del trabajo.

Sin más por el momento, me despido con un cordial saludo

Atentamente



---

Dr. Alejandro Martínez Ríos

UNIVERSIDAD DE  
GUANAJUATO



León Guanajuato, diciembre 2024

Dr. Modesto Sosa Aquino

Director de la división de ciencias e ingenierías, campus león

Universidad de Guanajuato

Estimado Dr. Modesto:

Por medio de la presente le informo que he revisado la tesis **"Laser de fibra óptica multi-longitud de onda como fuente de bombeo para generación de luz en el mediano IR"** escrita por Jesús Eliseo Vazquez Monzón estudiante de la licenciatura en ingeniería física. En mi opinión la tesis esta lista para ser presentada y estoy de acuerdo que se proceda con la defensa del trabajo.

Sin más por el momento, me despido con un cordial saludo

Atentamente

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser 'H. A. Perez Olivas', escrita sobre una línea horizontal.

Dr. Huetzin Aarón Perez Olivas

UNIVERSIDAD DE  
GUANAJUATO



León Guanajuato, diciembre 2024

Dr. Modesto Sosa Aquino

Director de la división de ciencias e ingenierías, campus león

Universidad de Guanajuato

Estimado Dr. Modesto:

Por medio de la presente le informo que he revisado la tesis **"Laser de fibra óptica multi-longitud de onda como fuente de bombeo para generación de luz en el mediano IR"** escrita por Jesús Eliseo Vazquez Monzón estudiante de la licenciatura en ingeniería física. En mi opinión la tesis esta lista para ser presentada y estoy de acuerdo que se proceda con la defensa del trabajo.

Sin más por el momento, me despido con un cordial saludo

Atentamente



---

Dr. Erick Sarmiento Gómez

UNIVERSIDAD DE  
GUANAJUATO



León Guanajuato, diciembre 2024

Dr. Modesto Sosa Aquino

Director de la división de ciencias e ingenierías, campus león

Universidad de Guanajuato

Estimado Dr. Modesto:

Por medio de la presente le informo que he revisado la tesis **"Laser de fibra óptica multi-longitud de onda como fuente de bombeo para generación de luz en el mediano IR"** escrita por Jesús Eliseo Vazquez Monzón estudiante de la licenciatura en ingeniería física. En mi opinión la tesis esta lista para ser presentada y estoy de acuerdo que se proceda con la defensa del trabajo.

Sin más por el momento, me despido con un cordial saludo

Atentamente

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser 'G. Anzueto', escrita sobre una línea horizontal.

Dr. Gilberto Anzueto Sánchez



## ACTA DE DEFENSA DE TRABAJO O PROYECTO SOBRESALIENTE

En la ciudad de León, Gto., siendo las 13:00, trece horas y cero minutos del día 10 de diciembre del año 2024 se reunieron en el Auditorio de la División de Ciencias e Ingenierías del campus León de la Universidad de Guanajuato, el Doctor Erick Sarmiento Gómez, el Doctor Huetzin Aarón Pérez Olivas y el Doctor Alejandro Martínez Ríos, designados para verificar el trabajo de tesis de JESÚS ELISEO VÁZQUEZ MONZÓN, a efecto de hacerse merecedor a la obtención de reconocimiento laureado en base a los Artículos 17 del Reglamento de Distinciones Universitarias y 78 del Reglamento Académico.

Instalado el jurado bajo la Presidencia del Doctor Erick Sarmiento Gómez, y fungiendo como Secretario el Doctor Huetzin Aarón Pérez Olivas, dio principio la defensa e interrogaron sucesivamente los tres sinodales sobre diversas materias y aspectos del trabajo de tesis y, terminado el interrogatorio, se procedió a verificar la votación secreta habiendo resultado JESÚS ELISEO VÁZQUEZ MONZÓN.

Aprobado por unanimidad de Votos

Para constancia se levanta la presente acta por duplicado que firma el jurado.

Presidente



Dr. Erick Sarmiento Gómez

Secretario



Dr. Huetzin Aarón Pérez Olivas

Vocal



Dr. Alejandro Martínez Ríos