



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

“Desarrollo de módulo de control para
automatizar el autoencendido de sistemas láser
de pulsos ultrarrápidos”

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
Maestro en Ingeniería Eléctrica

PRESENTA:

Ing. Maximino Roberto Tapia García

ASESORES:

Dr. Juan Carlos Hernández García
Dr. Roberto Rojas Laguna

SALAMANCA, GUANAJUATO

MAYO 2025

Para aquel que cree, todo es posible.

Agradecimientos

A Dios, por darme el regalo de la vida, y los dones de la fortaleza, la sabiduría, el entendimiento y el consejo.

A mis padres, Dulce María Margarita García Pérez y Maximino Tapia Rodríguez, por apoyarme de todas las maneras posibles. A mis hermanos, Dulce Azucena y Luis Fernando, por impulsarme a siempre superarme. A mi sobrina, Ana Sofía, y a mi sobrino y ahijado, Luis David, por recordarme que siempre hay que cuestionarlo todo y maravillarnos con el mundo. A mi familia, por compartir conmigo este momento y porque son importantes en mi vida.

A Stephanie Hernández, por acompañarme a lo largo de todo el proceso y a todos mis demás amigos y compañeros del laboratorio de Comunicaciones y Fibras Ópticas, Ismael Mora, Daniela Ortiz, Karla Liliana, Jesús Esparza, Alberto Franco, Jaritzzy Arriaga, Aylin Padilla, Iván Leyva, Eduardo Cabrera, Mario Piña, gracias por su amistad, apoyo y buenos deseos.

A mis directores de tesis, Dr. Juan Carlos Hernández García y Dr. Roberto Rojas Laguna, gracias por compartir sus conocimientos, sembrar la curiosidad, por su enorme paciencia y buenos consejos durante estos años.

A los doctores del Cuerpo Académico de Telecomunicaciones y Fotónica, Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala y Dr. Juan Manuel Sierra Hernández, gracias por contribuir con sus conocimientos y siempre estar dispuestos a resolver mis preguntas durante el desarrollo de este trabajo de tesis. A los sinodales, Dr. Juan Gabriel Aviña Cervantes, Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala, gracias por las revisiones y consejos para mejorar este trabajo de tesis.

Gracias a todas las personas que me ayudaron de alguna u otra manera, por su paciencia, por sus consejos, y por cualquier apoyo a este proyecto.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) actualmente la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la beca otorgada al CVU 1251088, Investigadoras e Investigadores por México (no. 6969), Ciencia de Frontera 2023 (CF 2023-109-G).



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

A la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, por los recursos para desarrollar este trabajo de tesis.



Campus Irapuato-Salamanca | División de Ingenierías

Resumen

En este trabajo de tesis presentamos el desarrollo de un sistema de control para automatizar el autoencendido de un láser pulsado de fibra óptica en configuración de figura en ocho. La señal de referencia es una señal pulsada, cuyos pulsos tienen una frecuencia de repetición de ~ 950 kHz y una duración de pulso global de ~ 10 ns formado por Pulsos de Ruido (Noise-Like Pulses) (NLPs) con una duración del orden de picosegundos a femtosegundos. Para modificar el estado del sistema nos centramos en la manipulación de las placas controladoras de polarización, lo que permite variar la transmisión del Espejo de Lazo Óptico No Lineal (Nonlinear Optical Loop Mirror) (NOLM) utilizando un diseño desarrollado de placas motorizadas. Para analizar el comportamiento temporal del sistema utilizamos el osciloscopio programable de Keysight de la serie 6000X (MSOX6004A). Finalmente, se realizaron pruebas para evaluar el desempeño del sistema de control, analizando: El control manual, logrando un tiempo de posicionamiento de ~ 5 segundos; El control automático del láser, realizando una búsqueda de regiones de amarre de pulsos obteniendo un tiempo de obtención del régimen pulsado promedio de ~ 11 segundos; y el sistema de caracterización, logrando la identificación y almacenamiento de las regiones de operación de interés, realizando barridos

a diferentes posiciones angulares en las placas controladoras de polarización. Demostrando que el módulo de control propuesto tiene aplicaciones en el control, la caracterización y el autoencendido de sistemas láser de pulsos ultrarrápidos.

Abstract

In this thesis we present the development of a control system to automate the self-tuning of a pulsed fiber laser in figure eight configuration. The reference signal is a pulsed signal, whose pulses have a repetition frequency of ~ 950 kHz and an overall pulse duration of ~ 10 ns formed of Noise-Like Pulses (NLPs) with durations of the order of picoseconds to femtoseconds. To modify the state of the system we focus on the manipulation of the polarization controller plates, which allows to vary the transmission of the Nonlinear Optical Loop Mirror (NOLM) using a developed design of motorized plates. To analyze the temporal behavior of the system we use the Keysight 6000X series programmable oscilloscope (MSOX6004A). Finally, tests were performed to evaluate the control system, analyzing: Manual control, achieving a positioning time of ~ 5 seconds; Automatic control of the laser, performing a search for pulsed regions, obtaining an average pulsed regime acquisition time of ~ 11 seconds; and the characterization system, achieving the identification and storage of the operating regions of interest by performing sweeps at different angular positions on the polarization controller plates. Demonstrating that the proposed control module has applications in the control, characterization and self-tuning of ultrafast pulse laser systems.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	V
Abstract	VII
Lista de abreviaciones	XVI
1. Introducción	1
1.1. Control en láseres pulsados	1
1.2. Justificación	8
1.2.1. Ventajas del control de láseres de fibra óptica	9
1.3. Objetivo	11
1.3.1. Objetivos específicos	11
1.4. Descripción de la tesis	12
1.5. Referencias del capítulo	14
2. Marco teórico	19
2.1. Láser	19
2.2. Láseres de fibra óptica	22

2.2.1.	Láser de fibra óptica en configuración lineal	25
2.2.2.	Láser de fibra óptica en configuración de anillo	26
2.2.3.	Láser de fibra óptica en configuración de figura en ocho	27
2.3.	Principios del amarre de modos en láseres de fibra óptica	27
2.3.1.	Principio de funcionamiento del amarre de modos	28
2.3.2.	Técnicas para el amarre de modos	30
2.3.3.	Espejo de lazo óptico no lineal	33
2.4.	Teoría del control y sistemas dinámicos	38
2.4.1.	Tipos de control por retroalimentación	42
2.4.2.	Estimación del estado	44
2.5.	Redes neuronales artificiales	44
2.5.1.	Conceptos generales	46
2.5.2.	Aprendizaje	47
2.5.3.	Redes neuronales en sistemas de control	48
2.6.	Diseño CAD	50
2.7.	Referencias del capítulo	52
3.	Diseño de módulos de control	56
3.1.	Proceso / planta	56
3.1.1.	Sistema láser	56
3.1.2.	Referencia	58
3.2.	Elemento de corrección	59
3.2.1.	Placas controladoras de polarización	59
3.2.2.	Motor a pasos	65
3.2.3.	Engranajes	65
3.2.4.	Sistema de posicionamiento	66

Índice general	x
<hr/>	
3.3. Sensor	68
3.3.1. LabVIEW	69
3.4. Controlador	70
3.4.1. Arduino	70
3.4.2. Comunicación I2C	71
3.5. Visual Studio	71
3.6. Algoritmo de posicionamiento	72
3.7. Estimación de las regiones de operación	74
3.8. Referencias del capítulo	78
4. Sistema de autoencendido del láser	79
4.1. Posicionamiento manual (Lazo abierto)	79
4.2. Posicionamiento automático (Lazo cerrado)	81
4.3. Caracterización de dispositivos	84
4.4. Referencias del capítulo	87
5. Conclusiones y trabajos futuros	88
5.1. Conclusiones	88
5.2. Trabajos a futuro	89
5.3. Artículos y participaciones en congresos	90
5.4. Distinciones obtenidas	93
A. Análisis de transmisión del NOLM	94
A.0.1. Análisis en régimen lineal (Bajas potencias)	95
A.0.2. Análisis en régimen no lineal (Altas potencias)	95
B. Placa de polarización motorizada	97

Índice general XI

C. Simulación del sistema láser 102

Índice de figuras

2.1. Esquema básico de un láser.	20
2.2. Esquema de diagrama de energía y procesos radiativos. (a) Absorción estimulada de bombeo a λ_{p1} . (b) Absorción estimulada de bombeo a λ_{p2} . (c) Emisión estimulada de señal a λ_s (Amplificación coherente). (d) Emisión espontánea (Ruido Amplificado).	22
2.3. Niveles energéticos de los iones de erbio.	23
2.4. Espectro de emisión de los Amplificadores de Fibra Dopada con Erbium (Erbium Doped Fiber Amplifiers) (EDFAs).	25
2.5. Esquema general de un láser de fibra óptica en configuración lineal.	26
2.6. Esquema general de un láser de fibra óptica en configuración de anillo.	26
2.7. Esquema general de un láser de fibra óptica en configuración de figura en ocho.	27
2.8. Señal de salida en Free running.	29
2.9. Señal de salida en estado pulsado.	29
2.10. Diagrama de un láser pulsado.	30

2.11. Interferómetro Sagnac de fibra óptica.	34
2.12. Transmisión del interferómetro de Sagnac.	35
2.13. NOLM desbalanceado en polarización.	36
2.14. Transmisión del Espejo de Lazo Óptico No Lineal (Nonlinear Optical Loop Mirror) (NOLM) desbalanceado en polarización para diferentes valores del ángulo de polarización lineal a la entrada.	38
2.15. Elementos de un sistema de control de lazo cerrado.	40
2.16. Ejemplo de una red neuronal totalmente conectada.	45
2.17. Representación de una simple neurona.	47
3.1. Diagrama del sistema Láser de Figura en 8 (Figure 8 Laser) (F8L).	57
3.2. Señal pulsada a la salida del F8L.	58
3.3. Trazo de autocorrelación de la señal pulsada.	58
3.4. Placas controladoras de polarización manuales de Thorlabs. . .	59
3.5. Gráfica del retardo inducido por placa.	61
3.6. Placas controladoras de polarización motorizadas de Thorlabs.	61
3.7. Prototipo de placas controladoras de polarización (Versión 1).	62
3.8. Prototipo de placas controladoras de polarización (Versión 2).	63
3.9. Impresión 3D de la placa del controlador de polarización. . . .	64
3.10. Corte láser en Fibropanel de Densidad Media (Medium-Density Fibreboard) (MDF) de las piezas de soporte del controlador de polarización.	64
3.11. Motor a pasos 28BYJ-48 para modificar la posición de la placa.	65

3.12. Perfil de los engranajes reductores para transmisión de movimiento.	66
3.13. Prototipo de placas controladoras de polarización (Versión 4).	67
3.14. Osciloscopio programable de Keysight MSOX6004A.	68
3.15. Interfaz en LabVIEW para la detección de la amplitud de pulsos.	69
3.16. Microcontrolador Arduino UNO para controlar el movimiento de las placas controladoras de polarización.	70
3.17. Interfaz en Visual Studio.	72
3.18. Diagrama del sistema de control.	72
3.19. Diagrama de flujo del algoritmo de control.	73
3.20. Regiones de operación del láser (Rojo: Emisión continua, Azul: Emisión quiasí-estable, Verde: Emisión pulsada estable).	74
3.21. Arquitectura de la red neuronal propuesta.	76
3.22. Regiones de operación del láser interpoladas con red neuronal.	77
3.23. Desfase entre las zonas de amarre a lo largo de días.	77
4.1. Arreglo experimental de F8L con sistema de control.	81
4.2. Variaciones en el tiempo de autoencendido.	82
4.3. Evolución temporal de los pulsos.	83
4.4. Amplitud de los pulsos en el tiempo.	83
4.5. Varios perfiles temporales obtenidos.	84
4.6. Varios trenes de pulsos obtenidos.	85
4.7. Distintos amplios espectros obtenidos.	85
A.1. Interferómetro Sagnac de fibra óptica.	94
C.1. Simulación de pulsos de ruido.	103

Índice de tablas

2.1. Matrices de Jones de algunos elementos ópticos para entrada en polarización lineal.	37
4.1. Comparación de los dos sistemas de polarización de Thorlabs y nuestro sistema propuesto.	80

Lista de abreviaciones

AM	Modulación de Amplitud (Amplitude Modulation)
AOM	Modulador Acusto-Óptico (Acousto-Optic Modulator)
ASE	Emisión Espontánea Amplificada (Amplified Spontaneous Emission)
CAD	Diseño Asistido por Computadora (Computer-Aided Design)
CW	Emisión Continua (Continuous Wave)
EDFAs	Amplificadores de Fibra Dopada con Erblio (Erbium Doped Fiber Amplifiers)
EYDCF	Fibra Dopada con Erblio de Doble Revestimiento (Erbium Ytterbium Double Cladding Fiber)
ESC	Control de Búsqueda de Extremos (Extremum Seeking Control)
FM	Modulación de Frecuencia (Frequency Modulation)
F8L	Láser de Figura en 8 (Figure 8 Laser)
HWR	Retardador de Media Onda (Half Wave Retarder)

MDF	Fibropanel de Densidad Media (Medium-Density Fibreboard)
MLL	Láser de Amarre de Modos (Mode-Locking Laser)
NLPs	Pulsos de Ruido (Noise-Like Pulses)
NOLM	Espejo de Lazo Óptico No Lineal (Nonlinear Optical Loop Mirror)
NPR	Rotación No Lineal de la Polarización (Nonlinear Polarization Rotation)
OSA	Analizador de Espectros Ópticos (Optical Spectrum Analyzer)
OSC	Osciloscopio (Oscilloscope)
PC	Controlador de Polarización (Polarization Controller)
PM	Modulación de Fase (Phase Modulation)
QWR	Retardador de Cuarto de Onda (Quarter Wave Retarder)
RF	Radiofrecuencia (Radiofrequency)
SMF	Fibra Monomodo (Single Mode Fiber)

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se mencionan los antecedentes sobre el avance que ha tenido la implementación de control en los láseres pulsados de fibra óptica y su desarrollo en el área de la automatización y redes neuronales, así como el objetivo y la justificación del desarrollo de este trabajo de tesis.

1.1. Control en láseres pulsados

Durante los últimos años, los láseres pulsados de fibra óptica con capacidad de adaptarse a distintos parámetros de operación, robustos a perturbaciones externas y autoajustables, han evadido la implementación práctica. La capacidad de lograr estos objetivos tiene el potencial de revolucionar tanto el sector comercial como el de investigación asociados con la ciencia ultrarrápida [1].

Los láseres pulsados de amarre de modos son herramientas esenciales para la generación de pulsos ultracortos, los cuales se generan al amarrar múltiples modos axiales en la cavidad del láser. Desde que se desarrolló el primer láser de amarre de modos de Ti:Zafiro en la década de 1990, la tecnología de pulsos ultracortos se ha aplicado ampliamente en la industria y la investigación científica, como imágenes multifotónicas, metrología de frecuencia, caracterización de películas delgadas, etc [2].

Una de las principales ventajas del uso de la fibra óptica para el desarrollo de este tipo de láseres es debido a que son más compactos y menos costosos que sus homólogos de estado sólido. Aunque la variedad de longitudes de onda de operación en un láser de fibra no es comparable a la de los láseres de estado sólido, sus ventajas lo han hecho exitoso en aplicaciones como endoscopia y procesamiento de materiales de precisión del orden de nanómetros.

La importancia tecnológica de los láseres de fibra con amarre de modos pasivo está bien reconocida [3,4]. En particular, los láseres de fibra representan dispositivos de alto rendimiento que ya se utilizan en diversas aplicaciones industriales, pero también sistemas no lineales interesantes y aún no completamente comprendidos; y una ubicación precisa y repetible de un régimen de pulsación específico es extremadamente desafiante.

Muchos tipos de láseres modernos presentan propiedades no lineales, lo que hace que controlar su funcionamiento sea un problema de ingeniería difícil de abordar [5]. Además, el amarre de modos es inherentemente no lineal

[6-8] y constituye un estado inestable [9]. Los láseres de fibra que funcionan a alta potencia suelen tener múltiples estados de equilibrio, y esto produce complicaciones con la reproducibilidad y el manejo de dichos dispositivos.

Los enfoques de aprendizaje automático con autoajuste y retroalimentación podrían definir una nueva frontera en la ciencia y la tecnología del láser. Recientemente se ha demostrado que las redes neuronales son muy efectivas para predecir las propiedades en el dominio del tiempo de las inestabilidades de la fibra óptica basándose en el análisis de perfiles de intensidad espectral. Específicamente, a partir únicamente de datos de intensidad espectral, una red neuronal adecuadamente entrenada puede predecir las características temporales del solitón en la generación de luz supercontinua [10], así como la presencia de picos temporales en la inestabilidad de la modulación que satisfacen los criterios de ondas gigantes. Por lo que es posible la predicción mediante aprendizaje automático de la propagación de Pulsos de Ruido (Noise-Like Pulses) (NLPs).

Esto ha llevado a esfuerzos recientes para integrar algoritmos de control adaptativo de última generación [11] con servocontrol de componentes ópticos recientemente desarrollados [12] para demostrar las primeras implementaciones de sistemas robustos y totalmente auto-sintonizables de láseres de fibra [13, 14]. Paralelamente, las técnicas matemáticas basadas en datos, que utilizan aprendizaje automático [15, 16, 17, 18], están teniendo un gran impacto en las ciencias físicas y de ingeniería. Al combinar estos métodos de aprendizaje automático con control adaptativo, se ha demostrado que se

puede lograr un funcionamiento robusto, y optimizar la caracterización y la búsqueda de regiones para mejorar el rendimiento del láser.

Debido a la aleatoriedad de los arreglos de fibras por las variaciones físicas en la fabricación de la fibra óptica, como la birrefringencia y cambios en el índice de refracción; y por la fluctuación de los parámetros en la cavidad causada por la variabilidad ambiental; y fenómenos no lineales; se requiere el desarrollo de métodos para estabilizar el láser. En 2014 Yi Gu utilizó la manipulación de la Rotación No Lineal de la Polarización (Nonlinear Polarization Rotation) (NPR) [20] para estabilizar y mejorar su rendimiento [2]. Para controlar de forma adaptativa la NPR en la cavidad, aplicó un algoritmo denominado algoritmo de Control de Búsqueda de Extremos (Extremum Seeking Control) (ESC) [13]. Los láseres de fibra de amarre de modos basados en la evolución de la polarización no lineal pueden generar pulsos de femtosegundos con diferentes anchos de pulso y distribuciones espectrales variadas para aplicaciones versátiles mediante el ajuste de polarización [5].

La misma no linealidad que hace posible el amarre de modos limita en última instancia el rendimiento del láser. Lo que ha llevado a los investigadores a idear distintas formas de gestionar la no linealidad.

Un enfoque complementario implica la gestión directa de los efectos no lineales [20], que van desde el uso de no linealidades negativas (auto desenfoco) [20, 21] hasta la identificación de esquemas de propagación de pulsos resistentes a la no linealidad. Los hitos incluyen la demostración del láser sin

ruptura de ondas [22] en 2003, el láser de similariton en 2004 [23], el láser de dispersión totalmente normal [24] en 2008, que soporta solitones disipativos [25], y el láser de solitón-similariton [26] en 2010, que tiene dos tipos de ondas no lineales que se propagan en la cavidad.

Si bien estos desarrollos han llevado a un rendimiento superior del láser y han revelado nuevas dinámicas, fue hasta la última década que empezó a surgir la posibilidad de control detallado sobre los estados que admiten los láseres [27].

En 2019 Kokhanovskiy, A., Ivanenko, A., Kobtsev, S., Smirnov, S., y Turitsyn, S [28] demostraron experimentalmente la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático para el control de los regímenes pulsados en un láser de fibra de figura en ocho de dispersión totalmente normal con dos lazos de fibra amplificadores independientes. La capacidad de controlar el estado de funcionamiento del láser variando electrónicamente dos corrientes de control hace que este esquema sea particularmente atractivo para implementar enfoques de aprendizaje automático debido al poco número de variables de control. El ajuste automático de dos niveles de ganancia independientes en la cavidad del láser permite generar pulsos bajo demanda con diferente duración, energía, características espectrales y coherencia temporal. Sin embargo, este tipo de láseres suele ser inestable en longitud de onda, debido al calor absorbido por el aumento de potencia necesario para el amarre.

En 2022 Mabed, M. utilizó simulaciones numéricas de comportamiento altamente caótico en un láser de pulsos similares al ruido para generar grandes conjuntos de datos espectrales y temporales para diferentes regímenes de operación, y, utilizando técnicas de aprendizaje supervisado, se demostró que una red neuronal entrenada puede correlacionar con precisión perfiles de intensidad espectral con picos de intensidad en el dominio del tiempo y reproducir las distribuciones de probabilidad de intensidad temporal asociadas [10].

La alternativa propuesta por Coraline Lapre (2023) y colaboradores [19] describe que, mediante el uso de algoritmos genéticos, es posible optimizar los parámetros dentro de una cavidad láser. Utilizaron el ajuste de un absorbedor saturable, y realizaban el ajuste de los ángulos de los retardadores de onda. Sin embargo, este arreglo utiliza elementos ópticos de bulto dentro del arreglo de fibra óptica, lo que aumenta las pérdidas.

En 2024 Qi Yan [30] propuso también el uso de algoritmos genéticos para predecir parámetros de operación, realizando el ajuste mediante la predicción de ángulos de placas retardadoras. Sin embargo, están limitados en regiones por el límite físico que tienen las placas motorizadas de Thorlabs en grados de libertad.

La generación de supercontinuo es un proceso altamente no lineal que exhibe características inestables y caóticas cuando se desarrolla a partir de largos pulsos de bombeo inyectados en el régimen de dispersión anómalo de

una fibra óptica [10]. Una característica particular asociada con este régimen es la estadística de intensidad espectral similar a una “onda gigante”. Estudiar estos fenómenos es importante para el desarrollo de nuevas tecnologías, utilizando el supercontinuo como fuente para análisis en espectroscopía y sensado [31] y el estudio oceanográfico de las ondas gigantes. Un láser pulsado de figura en ocho es capaz de generar distintos regímenes [32], por lo que es necesario poder estudiarlos de manera controlada y repetible.

Finalmente, en este trabajo de tesis, presentamos un módulo de control para automatizar el autoencendido de un F8L.

El esquema experimental consta de fibra de telecomunicaciones, una fibra de doble revestimiento dopada con Er/Yb que permite una mayor potencia en la salida del láser, un aislador óptico, un absorbedor saturable y placas retardadoras controladoras de la polarización.

El sistema de control automatizado basado en la polarización se desarrolló utilizando diseño asistido por computadora, fabricación aditiva, corte láser, y programación de equipo de medición, y se implementó en cada etapa de polarización dentro del láser de fibra.

El régimen del láser se ajusta automáticamente mediante un sistema de control óptico, compuesto por un Retardador de Cuarto de Onda (Quarter Wave Retarder) (QWR) para permitir el funcionamiento automático, mientras que los ángulos del QWR, y HWR y QWR del Controlador de Polari-

zación (Polarization Controller) (PC) permiten ajustar la duración temporal de los pulsos, así como el ancho espectral en la salida del láser.

El láser, utilizando ajustes automatizados sobre placas retardadoras, genera una emisión centrada en ~ 1543 nm y pulsos como de ruido con duraciones individuales de pulso entre 189.5 ps a 350 ps y duraciones globales de ~ 15 ns con frecuencias de repetición de 954 kHz, y es capaz de generar un espectro supercontinuo de hasta 200 nm. La emisión correspondiente a una operación de pulsos similares a ruido es de gran utilidad para el desarrollo de aplicaciones como generación de pulsos armónicos en amarre de modos, supercontinuo con alta planicidad, ondas ópticas extremas, entre otras.

1.2. Justificación

En muchas aplicaciones en óptica, es necesario un control preciso del comportamiento de la polarización para obtener un rendimiento óptimo de los componentes y sistemas ópticos [33]. También es importante porque se puede utilizar para transmitir señales y realizar mediciones sensibles [34,35]., ya que, a pesar de que la intensidad de la luz puede ser constante, se puede transmitir información valiosa en el estado de polarización de un haz óptico [34]. Diversos sensores y los equipos de medición pueden diseñarse para funcionar con tales cambios de polarización [35]. Por estas razones, los componentes ópticos capaces de filtrar, modificar y caracterizar la polarización de una fuente de luz son valiosos.

En un láser de figura en ocho la polarización es el instrumento de control que permite realizar el amarre de modos bajo ciertas condiciones. El ajuste de la polarización de la luz en un sistema óptico, para obtener cierto espectro a la salida, muchas veces es un proceso complejo, ya que conlleva diversos fenómenos como la birrefringencia, efectos lineales y no lineales, por mencionar algunos [36].

Debido a la naturaleza inestable de los sistemas láser y a la gran cantidad de parámetros que existen en un sistema de fibra óptica, una de las alternativas para realizar un control es el uso de redes neuronales. Uno de los beneficios clave del control inteligente es que puede ayudar a los sistemas a ser más eficientes y efectivos en el logro de sus objetivos, pues, en algunos casos, existen sistemas que son difíciles de modelar con ecuaciones diferenciales o los modelos matemáticos son altamente complejos y pueden complicar su diseño de control [37].

El propósito es proponer un sistema de autoajuste de un láser pulsado de fibra óptica basado en el control de la polarización, para apoyar la optimización en la obtención de diversos regímenes de operación de interés en sistemas láser.

1.2.1. Ventajas del control de láseres de fibra óptica

Los láseres de fibra óptica son dispositivos versátiles y eficientes que encuentran aplicaciones en diversos campos, como la medicina, la industria y la ciencia. Uno de los aspectos cruciales en el estudio y funcionamiento de estos

láseres es la polarización de la luz, ya que puede jugar un papel importante en los distintos espectros de salida que un láser podría tener.

El uso de módulos de control para facilitar el estudio y caracterización de los láseres pulsados de fibra cuenta con grandes ventajas:

- **Practicidad y rapidez:** Los sistemas de control automático son prácticos y operan rápidamente. Proporcionan respuestas casi inmediatas en los sistemas, lo que es esencial para ajustar parámetros en tiempo real.
- **Reducción de errores humanos:** La automatización minimiza la intervención manual y los errores que podrían surgir en los procesos. En lugar de depender de la precisión y experiencia del investigador, el sistema programable responde automáticamente según una orden específica.
- **Eficiencia:** La automatización regula la conducta del dispositivo o de otro sistema para cumplir un objetivo determinado. Esto mejora la eficiencia y permite una gestión más efectiva de los recursos, sobre todo el tiempo de encendido y búsqueda de regímenes específicos.

El control automático en láseres de fibra óptica ofrece una serie de beneficios, desde la agilidad en las respuestas hasta la reducción de errores y costos. Su implementación puede potenciar aún más las aplicaciones de estos dispositivos en diversas áreas.

1.3. Objetivo

Implementación de un sistema de control automático basado en el diseño de placas controladoras de polarización automatizadas para láseres de fibra óptica, con el propósito de contar con un sistema de autoencendido que permita el control sobre los pulsos en un láser de fibra óptica con utilidad en aplicaciones de estudio y caracterización de dispositivos.

1.3.1. Objetivos específicos

- Revisión bibliográfica sobre el uso de sistemas de control para el ajuste de sistemas ópticos.
- Entrenar en el manejo de la fibra óptica y láseres de fibra.
- Entrenar en el manejo del equipo de medición en sistemas ópticos como el Analizador de Espectros Ópticos (Optical Spectrum Analyzer) (OSA).
- Diseño de placas controladoras de polarización automatizadas con mejoras destacables respecto a las comerciales.
- Diseñar el sistema de comunicación para conectar el sistema de medición con el sistema de control y los actuadores.
- Diseñar la interfaz para despliegue y envío de datos a cada etapa.
- Realizar pruebas del movimiento de las placas en modo manual.
- Realizar pruebas en modo automático leyendo el osciloscopio.

- Diseñar la red neuronal para predecir regímenes de operación.
- Realizar pruebas de la red neuronal y corregir desfases en los datos.
- Realizar pruebas del sistema de control inteligente completo.
- Desarrollo de trabajo de tesis, y obtención del grado de Maestro en Ingeniería en tiempo y forma.

1.4. Descripción de la tesis

En el Capítulo 2 se expone el principio de operación de un láser, así como sus principales componentes para generar una fuente de luz coherente. Además, para los láseres pulsados, se presenta una breve descripción del esquema básico y la técnica que permite su operación en dicho régimen. Finalmente, se presentan unos antecedentes de la teoría del control basada en redes neuronales y el diseño CAD para la elaboración de prototipos en ingeniería.

En el Capítulo 3 se presentan los elementos que conforman al sistema de control, la construcción de placas motorizadas de polarización modulares, el desarrollo de la interfaz para controlar el osciloscopio como instrumento de medición y el diseño de la interfaz que controla el sistema de control y la arquitectura de la red neuronal para predecir regímenes de operación.

En el capítulo 4 se presentan las pruebas y resultados del sistema de control, evaluando los tres modos de operación: En lazo abierto un correcto posicionamiento de cada una de las placas controladoras de polarización para

la caracterización de dispositivos, y en lazo cerrado para el autoencendido del láser.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones, aportaciones y trabajos a futuro para continuar con el estudio y desarrollo sobre la línea de investigación y áreas en las que impacta este proyecto.

1.5. Referencias del capítulo

- [1] Brunton, S. L., Fu, X., y Kutz, J. N. (2014). Self-tuning fiber lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 20(5), 464-471.
- [2] Gu, Y. (2014). Adaptive controlled Mode-locked Fiber Laser.
- [3] Xu, C., y Wise, F. W. (2013). Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy. *Nature photonics*, 7(11), 875-882.
- [4] Fermann, M. E., y Hartl, I. (2013). Ultrafast fibre lasers. *Nature photonics*, 7(11), 868-874.
- [5] Pu, G., Yi, L., Zhang, L., Luo, C., Li, Z., y Hu, W. (2020). Intelligent control of mode-locked femtosecond pulses by time-stretch-assisted real-time spectral analysis. *Light: Science y Applications*, 9(1), 13.
- [6] Bale, B. G., Kieu, K., Kutz, J. N., y Wise, F. (2009). Transition dynamics for multi-pulsing in mode-locked lasers. *Optics express*, 17(25), 23137-23146.
- [7] Feehan, J. S., Ilday, F. Ö., Brocklesby, W. S., y Price, J. H. (2016). Simulations and experiments showing the origin of multiwavelength mode locking in femtosecond, Yb-fiber lasers. *JOSA B*, 33(8), 1668-1676.
- [8] Gordon, A., y Fischer, B. (2002). Phase transition theory of many-mode ordering and pulse formation in lasers. *Physical review letters*, 89(10), 103901.
- [9] Tamura, K., Ippen, E. P., Haus, H. A., y Nelson, L. E. (1993). 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser. *Optics letters*, 18(13), 1080-1082.

-
- [10] Mabed, M., Meng, F., Salmela, L., Finot, C., Genty, G., y Dudley, J. M. (2022). Machine learning analysis of instabilities in noise-like pulse lasers. *Optics Express*, 30(9), 15060-15072.
- [11] Krstic, M., y Wang, H. H. (2000). Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems. *Automatica*, 36(4), 595-601.
- [12] Shen, X., Li, W., Yan, M., y Zeng, H. (2012). Electronic control of nonlinear-polarization-rotation mode locking in Yb-doped fiber lasers. *Optics Letters*, 37(16), 3426-3428.
- [13] Brunton, S. L., Fu, X., y Kutz, J. N. (2013). Extremum-seeking control of a mode-locked laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 49(10), 852-861.
- [14] Radnatarov, D., Khripunov, S., Kobtsev, S., Ivanenko, A., y Kukarin, S. (2013). Automatic electronic-controlled mode locking self-start in fibre lasers with non-linear polarisation evolution. *Optics express*, 21(18), 20626-20631.
- [15] Bishop, C. M., y Nasrabadi, N. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning* (Vol. 4, No. 4, p. 738). New York: springer.
- [16] Hart, P. E., Stork, D. G., y Duda, R. O. (2000). *Pattern classification*. Hoboken: Wiley.
- [17] Murphy, K. P. (2012). *Machine learning: a probabilistic perspective*. MIT press.
- [18] Fu, X., Brunton, S. L., y Nathan Kutz, J. (2014). Classification of birefringence in mode-locked fiber lasers using machine learning and sparse representation. *Optics express*, 22(7), 8585-8597.

-
- [19] Shen, X., Li, W., Yan, M., y Zeng, H. (2012). Electronic control of nonlinear-polarization-rotation mode locking in Yb-doped fiber lasers. *Optics Letters*, 37(16), 3426-3428.
- [20] Ilday, F. Ö., y Wise, F. W. (2002). Nonlinearity management: a route to high-energy soliton fiber lasers. *JOSA B*, 19(3), 470-476.
- [21] Phillips, C. R., Mayer, A. S., Klenner, A., y Keller, U. (2015). Femtosecond mode locking based on adiabatic excitation of quadratic solitons. *Optica*, 2(8), 667-674.
- [22] Ilday, F. Ö., Buckley, J. R., Lim, H., Wise, F. W., y Clark, W. G. (2003). Generation of 50-fs, 5-nJ pulses at 1.03 μm from a wave-breaking-free fiber laser. *Optics letters*, 28(15), 1365-1367.
- [23] Ilday, F. Ö., Buckley, J. R., Clark, W. G., y Wise, F. W. (2004). Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser. *Physical review letters*, 92(21), 213902.
- [24] Renninger, W. H., Chong, A., y Wise, F. W. (2008). Dissipative solitons in normal-dispersion fiber lasers. *Physical Review A*, 77(2), 023814.
- [25] Grellu, P., y Akhmediev, N. (2012). Dissipative solitons for mode-locked lasers. *Nature photonics*, 6(2), 84-92.
- [26] Oktem, B., Ülgüdür, C., y Ilday, F. Ö. (2010). Soliton–similariton fibre laser. *Nature Photonics*, 4(5), 307-311.
- [27] Iegorov, R., Teamir, T., Makey, G., y Ilday, F. Ö. (2016). Direct control of mode-locking states of a fiber laser. *Optica*, 3(12), 1312-1315.

-
- [28] Kokhanovskiy, A., Ivanenko, A., Kobtsev, S., Smirnov, S., y Turitsyn, S. (2019). Machine learning methods for control of fibre lasers with double gain nonlinear loop mirror. *Scientific reports*, 9(1), 2916.
- [29] Lapre, C., Meng, F., Hary, M., Finot, C., Genty, G., y Dudley, J. M. (2023). Genetic algorithm optimization of broadband operation in a noise-like pulse fiber laser. *Scientific Reports*, 13(1), 1865.
- [30] Yan, Q., Tian, Y., Zhang, T., Lv, C., Meng, F., Jia, Z., y Qin, G. (2024, January). Machine learning based automatic mode-locking of a dual-wavelength soliton fiber laser. In *Photonics* (Vol. 11, No. 1, p. 47). MDPI.
- [31] Aalto, A. (2020). *Advanced Optical Techniques for Gas Sensing Using Supercontinuum Sources*.
- [32] Pottiez, O., Grajales-Coutiño, R., Ibarra-Escamilla, B., Kuzin, E. A., y Hernández-García, J. C. (2011). Adjustable noiselike pulses from a figure-eight fiber laser. *Applied Optics*, 50(25), E24-E31.
- [33] Bruce, N. C., y Téllez, J. M. L. *Medición de la polarización de la luz*.
- [34] Caucheteur, C., Guo, T., y Albert, J. (2016). Polarization-assisted fiber Bragg grating sensors: Tutorial and review. *Journal of Lightwave Technology*, 35(16), 3311-3322.
- [35] Li, X., Zhang, H., Qian, C., Ou, Y., Shen, R., y Xiao, H. (2020). A new type of structure of optical fiber pressure sensor based on polarization modulation. *Optics and Lasers in Engineering*, 130, 106095.
- [36] Collett, E. (2003). *Polarized light in fiber optics*. SPIE Press.

-
- [37] Blondin, M. J., Sanchis Sáez, J., y Pardalos, P. M. (2019). Control engineering from classical to intelligent control theory-an overview. Computational Intelligence and Optimization Methods for Control Engineering.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se expone el principio de operación de un láser, así como sus principales componentes para generar una fuente de luz coherente. Además, para los láseres pulsados, se presenta una breve descripción del esquema básico y la técnica que permite su operación en dicho régimen. Finalmente, se presentan los antecedentes de la teoría del control basada en redes neuronales y el diseño CAD para la elaboración de prototipos en ingeniería.

2.1. Láser

El principio de amplificación de la luz por emisión estimulada (principio Láser) genera fuentes de luz coherentes conocidas como láseres, los cuales se definen como un dispositivo que utiliza la emisión estimulada de radiación para generar un haz de luz [1]. Esta fuente de luz se caracteriza principalmente por su coherencia temporal, relacionada con su emisión cuasi-monocromática, y su coherencia espacial, donde las ondas emitidas conservan una diferencia

de fase constante, lo que a su vez genera un frente de onda direccional. El esquema general de un láser está conformado por tres principales elementos: una fuente de bombeo (para inyectar energía al sistema), un medio activo (un material con iones que, al cambiar de nivel, emitan luz amplificada) y una cavidad resonante (un área de confinamiento para favorecer la retroalimentación de la luz amplificada). En la Figura 2.1 se muestra este esquema, donde la cavidad resonante está formada por dos espejos (espejo 100 % reflejante y parcialmente reflejante) y dentro se encuentra el medio activo.

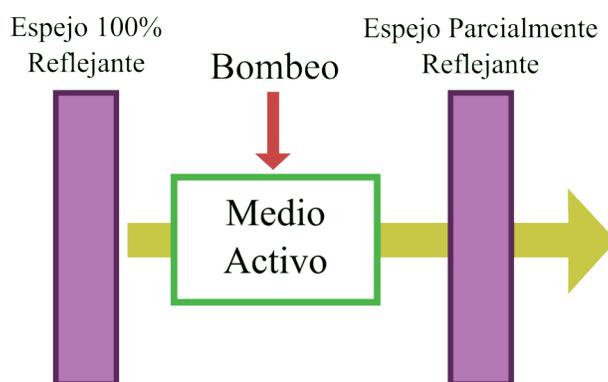


Figura 2.1: Esquema básico de un láser.

El principio de operación del láser fue presentado en las investigaciones realizadas en 1916 por Albert Einstein [2]. En las cuales se describen los procesos radiativos y las etapas de la emisión de luz al bombear iones y propiciar las interacciones entre los niveles energéticos. Estos procesos, ilustrados en la Figura 2.2, son:

- Absorción: Es la primera etapa de emisión. Consiste en la interacción entre un fotón de bombeo λ_p y un ion que inicialmente se encuentra en

su estado fundamental. Al interactuar, el ion absorbe al fotón y con el exceso de energía pasa a estar en un estado excitado.

$$E_p = \frac{hc}{\lambda_p} \quad (2.1)$$

- Emisión espontánea: Es la segunda etapa de la emisión. El ion no puede permanecer por siempre en el estado excitado, por lo que después de un cierto tiempo decae nuevamente al estado fundamental, y el exceso de energía lo emite en forma de un fotón en una dirección aleatoria.
- Emisión estimulada: La tercera etapa de emisión consiste en la interacción entre un fotón de señal λ_s y un ion que inicialmente se encuentre en el estado excitado. El resultado de la interacción es que el ion regrese a su estado base, emitiendo un segundo fotón con las mismas características de dirección y fase.

$$E_s = \frac{hc}{\lambda_s} \quad (2.2)$$

Para favorecer este proceso es necesario que la cantidad de iones en estado excitado sea mayor que los que se encuentran en el estado fundamental; a este proceso se le conoce como inversión de población. Sin embargo, esta condición no es suficiente para generar una emisión de luz, debido a que se deben compensar las pérdidas en el resonador, lo cual ocurre después de varios ciclos de retroalimentación, cuando finalmente se genera una oscilación estable al ser superadas las pérdidas por las ganancias.

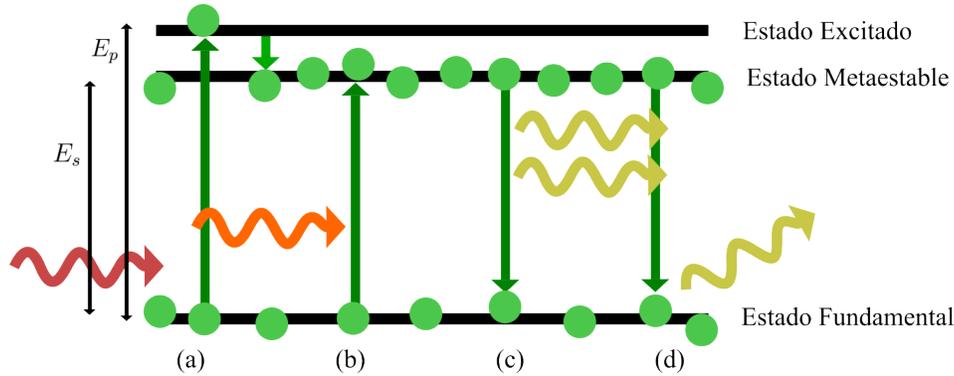


Figura 2.2: Esquema de diagrama de energía y procesos radiativos.

- (a) Absorción estimulada de bombeo a λ_{p1} .
- (b) Absorción estimulada de bombeo a λ_{p2} .
- (c) Emisión estimulada de señal a λ_s (Amplificación coherente).
- (d) Emisión espontánea (Ruido Amplificado).

2.2. Láseres de fibra óptica

Los láseres compuestos por fibra óptica, como el que se analiza en este trabajo, siguen la misma topología y principio de funcionamiento ya descritos. Con la diferencia de que los elementos están basados en fibra óptica.

El medio de bombeo que excita a los iones en el medio activo es la luz de un diodo láser. El medio activo lo constituye una fibra dopada con iones de los elementos de las tierras raras; estos son usualmente utilizados para los amplificadores ópticos para generar un medio de ganancia con un ensanchamiento homogéneo y se les denomina amplificadores. Los EDFAs son los más utilizados para los sistemas de comunicaciones ópticas debido a que generan un espectro prácticamente plano en las ventanas de comunicación como la banda C (1530 a 1560 nm) y la banda L (1570 a 1620 nm) [1].

El proceso de bombeo en una fibra dopada con erbio es comúnmente descrito como un sistema de energía de tres niveles como se ilustra en la Figura 2.3. El bombeo de los fotones en la longitud de onda $\lambda_p = 980$ nm es capaz de excitar los iones de erbio y llevarlos del estado fundamental al estado excitado, en el cual permanecerán por un tiempo de $\sim 1\mu s$, y después decaerán a un estado metaestable. Finalmente, la recombinación radiativa ocurre cuando los iones decaen del estado metaestable al estado fundamental y emiten fotones en la longitud de onda cercana a $\lambda_s = 1550$ nm [1].

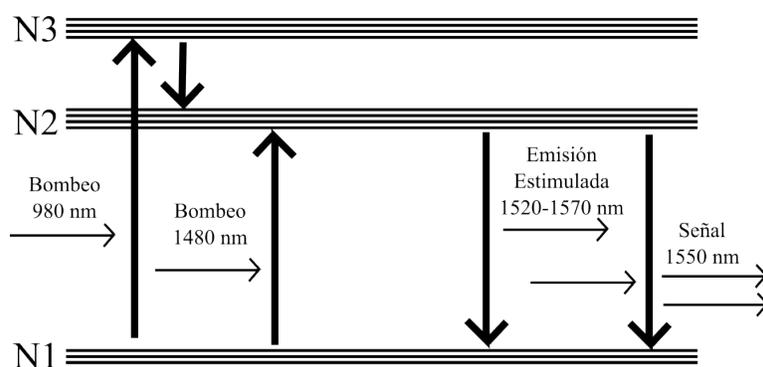


Figura 2.3: Niveles energéticos de los iones de erbio.

El tiempo de vida del ion de erbio en el estado metaestable es del orden de $10 \mu s$, considerablemente mayor que el tiempo de vida en el estado excitado, por lo que el sistema de tres niveles puede ser simplificado en un sistema de dos niveles en varias aplicaciones.

Un bombeo a 1480 nm es más eficiente que el bombeo a 980 nm debido a que el bombeo a 1480 nm no involucra transición de no radiación desde la banda de 980 a 1480 nm, pues la longitud de onda de 1480 coincide con la

energía de la banda prohibida entre el estado metaestable y el excitado. Las longitudes de onda generadas por el diagrama de niveles. Sin embargo, se utiliza el bombeo a 980 debido a la relación calidad-precio entre estos láseres de bombeo, ya que un láser a 980 nm es más barato y, aun así, se aprovecha su energía para favorecer la emisión estimulada.

Los niveles energéticos no son líneas infinitamente delgadas, sino que abarcan distintas regiones a su alrededor, las transiciones entre estos niveles tienen longitudes de onda asociadas que van desde los 1420 hasta los 1620 nm. Aunque no todas las longitudes de onda se emiten con la misma potencia debido a la presencia de ruido óptico, este ruido proviene de emisiones espontáneas cuya dirección de emisión del fotón coincide con la dirección de la emisión estimulada, por lo que recorren la cavidad y son amplificadas, es por ello por lo que se le conoce como Ruido de Emisión Espontánea Amplificada (Amplified Spontaneous Emission) (ASE).

Al observar el espectro obtenido al bombear la fibra dopada con erbio, se obtiene un amplio espectro con una potencia máxima centrada en 1532 nm y una región semiplana que comprende alrededor de 20 nm. Figura 2.4.

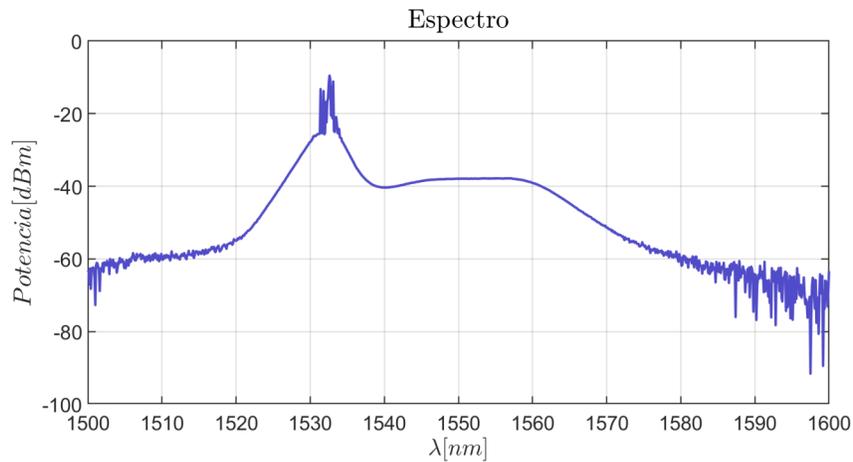


Figura 2.4: Espectro de emisión de los EDFAs.

Finalmente, la cavidad resonante se obtiene al formar una configuración con la fibra que permita la retroalimentación del sistema, confinando la luz a circular a través del amplificador de fibra. En la 2.4 podemos observar pequeñas componentes de emisión láser, debido a la cavidad, en 1535 nm aproximadamente.

2.2.1. Láser de fibra óptica en configuración lineal

Este tipo de configuración es la equivalente al esquema fundamental del láser, ya que cuenta con dos espejos en los extremos (fabricados mediante fibra recubierta por algún metal, rejillas de Bragg, entre otras alternativas), el medio activo con su respectivo bombeo en el medio y la fibra para confinar la luz formando la cavidad resonante, agregando un acoplador para obtener una muestra de la salida si es necesario cuando ambos espejos son totalmente reflejantes.

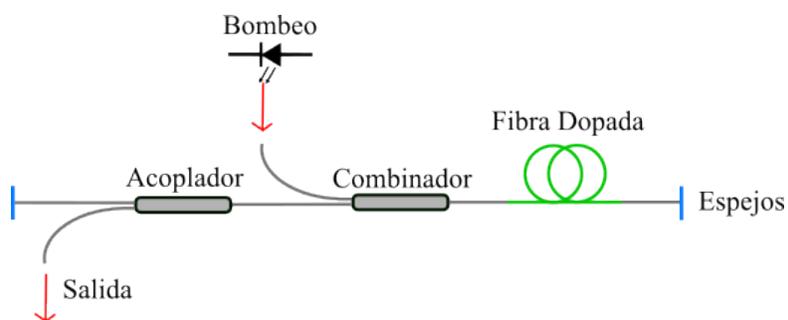


Figura 2.5: Esquema general de un láser de fibra óptica en configuración lineal.

2.2.2. Láser de fibra óptica en configuración de anillo

La configuración de anillo se denomina así debido a que la cavidad resonante forma un lazo, uniendo los extremos de la fibra y eliminando la necesidad de utilizar espejos para confinar la luz.

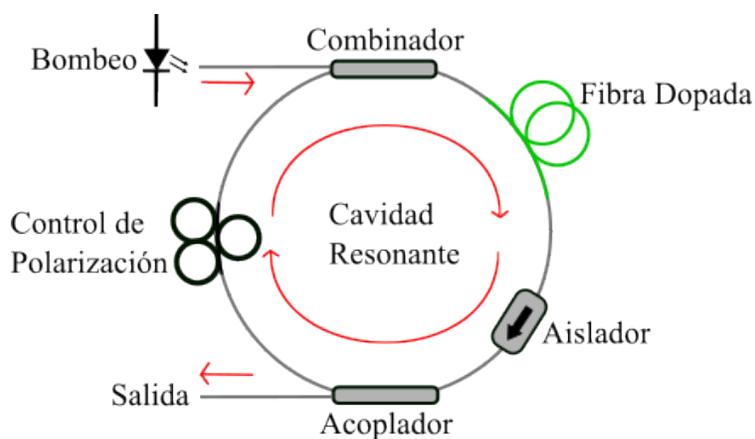


Figura 2.6: Esquema general de un láser de fibra óptica en configuración de anillo.

2.2.3. Láser de fibra óptica en configuración de figura en ocho

La configuración de figura en ocho obtiene su nombre gracias a un elemento adicional sobre un láser en anillo, el cual agrega un segundo lazo y da la característica forma de un ocho. Este elemento adicional es un interferómetro de Sagnac No Lineal o NOLM.

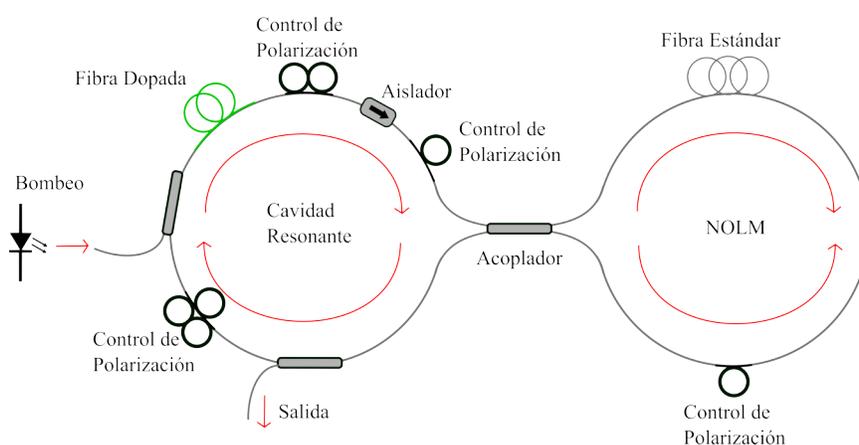


Figura 2.7: Esquema general de un láser de fibra óptica en configuración de figura en ocho.

2.3. Principios del amarre de modos en láseres de fibra óptica

Hasta ahora hemos discutido cómo obtener una emisión continua de luz. Mientras que para este tipo de emisión se prefiere una transmisión monomodal para mejorar la estabilidad, es decir, de un único haz de luz; para conseguir una emisión pulsada, la inestabilidad multimodal es el mecanismo

por aprovechar. Debemos agregar un elemento de transmisión variable que propicie la cesión de energía entre los modos; este intercambio de energía modificará las fases entre ellos.

2.3.1. Principio de funcionamiento del amarre de modos

El amarre de modos, en un láser, implica introducir una condición de fase constante entre los modos longitudinales de la cavidad. Esta condición es establecida mediante una técnica activa o pasiva [3]. Podemos ejemplificar su funcionamiento en las siguientes etapas.

- Free running: Inicialmente, los modos se encuentran desfasados, cada uno con una frecuencia y fase distintas. Un láser puede oscilar en un distintas frecuencias resonantes cuyo espaciamiento es igual a la frecuencia fundamental ω_R de la cavidad [4].

$$\omega_i - \omega_{i-1} = \frac{\pi c}{L} = \omega_R \quad (2.3)$$

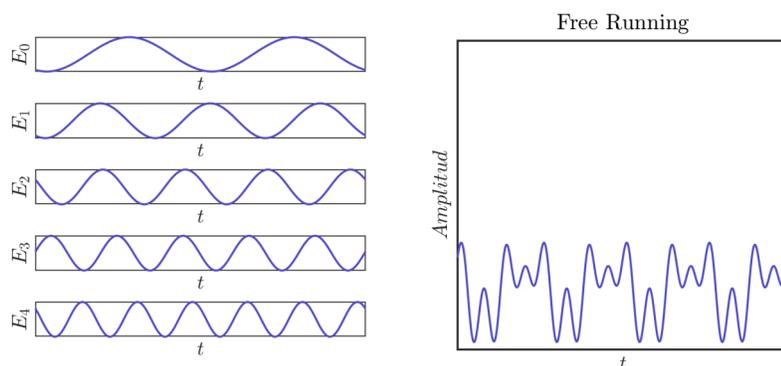
- Detección: Al llegar al fotodetector, éste no ve los modos por separado, sino que combina cada uno en una nueva señal $s(t)$, formada por la suma de cada uno de los modos individuales [4].

$$s(t) = \sum_n E_n e^{j[(\omega_0 + n\omega_R)t + \Phi_n]} \quad (2.4)$$

- Amarre de modos: La técnica consiste en hacer coincidir la fase de cada uno de los modos, haciendo que coincidan en un máximo. El caso más simple es cuando $E_n = 1$ y $\Phi_n = 0$

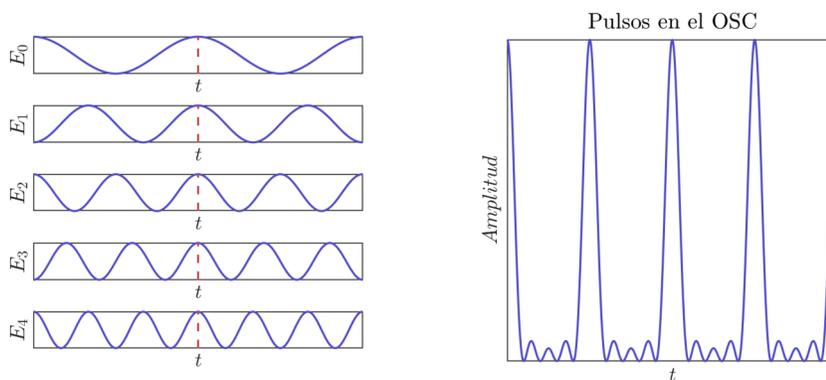
- De igual manera, la detección se hace simultanea y de todas las señales combinadas. Realizando el análisis matemático se obtiene [4]:

$$s(t) = \cos(\omega_0 t) \frac{\text{sen}\left(\frac{N\omega_R t}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\omega_R t}{2}\right)} \quad (2.5)$$



(a) Distintos modos desfasados. (b) Suma de las señales senoidales.

Figura 2.8: Señal de salida en Free running.



(a) Distintos modos en fase. (b) Suma de las señales senoidales.

Figura 2.9: Señal de salida en estado pulsado.

2.3.2. Técnicas para el amarre de modos

El principio para la generación de una serie de pulsos repetitivos se basa en el amarre en uno de los modos longitudinales de una cavidad láser [5]. En la Figura 2.10 se muestra un diagrama esquemático fundamental de láseres de amarre de modos, que consta de una cavidad formada por los espejos total y parcialmente reflejantes, un dispositivo amplificador para compensar la pérdida de energía, proporcionando ganancia suficiente, y una sección de sintonización para generar la condición de amarre de la energía de la onda de luz a un armónico particular; esta sección puede ser un absorbedor saturable o un modulador óptico para generar la tasa de repetición en asociación con el mecanismo de amarre.

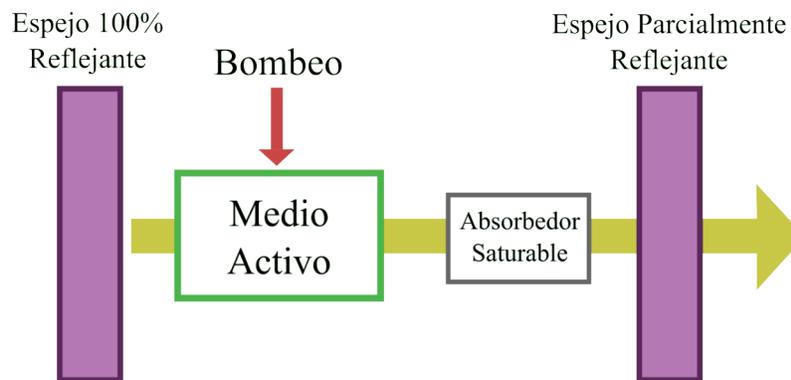


Figura 2.10: Diagrama de un láser pulsado.

Para conseguir el amarre de modos existen dos principales técnicas, el amarre de modos pasivo (elementos totalmente de fibra) y el amarre de modos activo (uso de elementos electro-ópticos o acusto-ópticos).

En la primera, los pulsos se forman pasivamente a través de la estructura interna del láser, lo que brinda más ventajas (menor pérdida, alta ganancia) a la señal si viaja en forma de pulso en lugar de en Emisión Continua (Continuous Wave) (CW) [6–11]. El método más sencillo es insertar un absorbedor saturable en la cavidad, el cual es un componente óptico no lineal cuyo coeficiente de absorción disminuye cuando aumenta la intensidad óptica. Por lo tanto, el tren de pulsos con una intensidad máxima alta pasaría a través del absorbedor con mucha menos pérdida en comparación con el de una componente láser CW con varios modos, ya que la energía disponible se concentra en los pulsos periódicos, por lo que se puede formar un tren de pulsos estable en la cavidad.

También es posible utilizar como elemento la técnica de NPR para el bloqueo del modo pasivo [12]. En este sistema, se impone un cambio de fase no lineal a la señal con una potencia máxima alta y, por lo tanto, gira su estado de polarización para alinearse con el eje del analizador. De este modo, la señal pasa a través del analizador con una pérdida mínima. Por otro lado, la señal CW con una potencia promedio baja experimenta un desplazamiento de fase no lineal nulo y, por lo tanto, su estado de polarización no gira para alinearse con el eje del analizador. Luego es bloqueado por el analizador. Por lo tanto, en la cavidad se forman pulsos con una potencia máxima alta en lugar de CW con una potencia promedio baja.

Un Láser de Amarre de Modos (Mode-Locking Laser) (MLL) Pasivo tiene la capacidad de producir un pulso temporal láser muy corto, de hasta

femtosegundos [13]. Además, el amarre de modos pasivo es un fenómeno de autobloqueo, lo que significa que el pulso se forma sin ninguna señal moduladora externa. Sin embargo, el espaciado entre dos pulsos varía de un pulso a otro, ya que no existe ningún mecanismo de control para forzar que los pulsos estén igualmente espaciados. Esta es la desventaja que hace que los MLL pasivos no sean adecuados para sistemas de transmisión óptica de alta velocidad, en los que se requiere una sincronización precisa de un pulso a otro.

En un MLL Activo, el amarre de modo puede ser inducido mediante Modulación de Amplitud (Amplitude Modulation) (AM), Modulación de Fase (Phase Modulation) (PM) o Modulación de Frecuencia (Frequency Modulation) (FM). Cuando la amplitud es modulada por una señal de Radiofrecuencia (Radiofrequency) (RF) externa con una frecuencia FM, el modo de oscilación en la frecuencia óptica f_0 esparce su energía en las dos bandas laterales ubicadas en $f_0 + f_m$ y $f_0 - f_m$, si la frecuencia de modulación f_m se elige de manera que $f_m = f_R$, las bandas laterales coinciden con los modos adyacentes del láser y, por lo tanto, la energía de un modo se transfiere a la de sus adyacentes [4]. En otras palabras, las energías de los modos del láser se transfieren de uno a otro. Esto provoca que la fase de los modos se amarre entre sí y, por tanto, se forme un tren de impulsos de modos amarrados. En MLL activo, el amarre de modo se induce modulando la ganancia o pérdida de la cavidad con una señal externa en la frecuencia fundamental f_R . Un método común de bloqueo del modo activo es insertar un Modulador Acusto-Óptico (Acousto-Optic Modulator) (AOM) en la cavidad.

Otro método de amarre de modos es modular la ganancia del medio amplificador [14]. Modulando la ganancia del amplificador semiconductor mediante una señal externa. Por lo tanto, las ondas de luz experimentan una ganancia periódica y forman pulsos en la cavidad.

Experimentalmente, el amarre de modos puede llegar a ser complicado debido a variaciones en la cavidad como la temperatura, torsiones y movimientos al manipular la fibra, vibraciones, etcétera; es por ello por lo que en muchas ocasiones difícilmente se puede obtener un tren de pulsos de salida estable a largo plazo debido a su larga cavidad [15–18]. Por lo tanto, existe la necesidad de estabilizar el láser de modo que el tren de impulsos de salida pueda usarse como una fuente práctica para distintas aplicaciones.

2.3.3. Espejo de lazo óptico no lineal

En los láseres de figura en ocho, el absorbedor saturable se logra mediante un espejo NOLM, el cual está conformado por un interferómetro de Sagnac operando en régimen no lineal y es el que le da al láser su característica figura en ocho.

Un interferómetro es un dispositivo basado en la superposición de dos haces de luz que recorren distintos caminos. El interferómetro de Sagnac de fibra óptica está compuesto por un acoplador de cuatro puertos, con dos de ellos conectados entre sí formando un lazo [19].

El haz de luz de entrada E_{in} es dividido por el acoplador en dos componentes complementarias proporcionales al factor de acoplamiento (c), una que viaja en el sentido horario E_{cw} y la otra en sentido antihorario E_{ccw} , viajan a lo largo del lazo y nuevamente se recombinan con el acoplador para producir una salida E_{out}

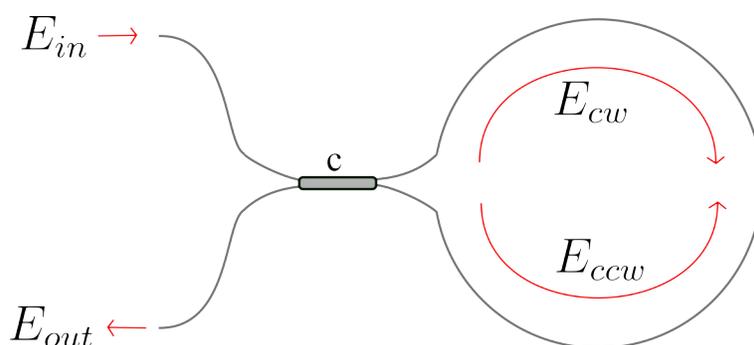


Figura 2.11: Interferómetro Sagnac de fibra óptica.

Para un análisis a detalle de la obtención de las ecuaciones, ir al apéndice A. La transmisión del dispositivo está definida como:

$$T(c) = 1 - 4c(1 - c) \quad (2.6)$$

Una ecuación para la variación de la transmisión en función del factor de acoplamiento. Podemos notar que cuando dicho factor vale 0.5, la transmisión es mínima con un valor de cero, y la reflexión máxima con un valor de uno, es decir, el dispositivo se comporta como un espejo, es por ello por lo que también se le conoce como espejo de lazo óptico.

En altas potencias, considerando entonces no linealidades, tenemos un caso similar; sin embargo, ahora la transmisión depende no sólo del factor de acoplamiento, sino también de la potencia de entrada.

$$T(c) = 1 - 2c(1 - c)[1 + \cos(\gamma L(1 - 2c)P_{in})] \quad (2.7)$$

Donde γ es el coeficiente no lineal de la fibra, L la longitud del lazo, c el factor de acoplamiento y P_{in} la potencia de entrada.

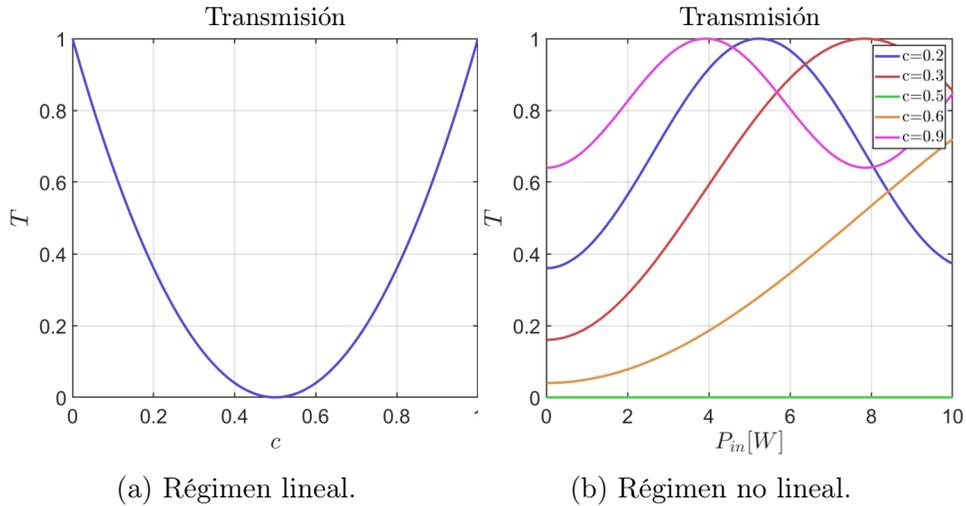


Figura 2.12: Transmisión del interferómetro de Sagnac.

El acoplador es, por lo tanto, el dispositivo que descompensa los caminos ópticos para que ocurra la interferencia; los caminos ópticos están desbalanceados en potencia, sin embargo, es inviable utilizarlo como dispositivo de control debido a que los acopladores son fabricados con un factor de acoplamiento fijo, es por ello que se recurre a utilizar un desbalanceo en polarización, el cual puede implementarse introduciendo birrefringencia con un PC.

Controlando de cierta manera las fases entre los haces propagándose, introduciendo fibra torcida que introduce birrefringencia circular en la fibra en el esquema [20] y un controlador de polarización QWR para modificar el estado de polarización, podemos realizar un interferómetro de Sagnac desbalanceado en polarización.

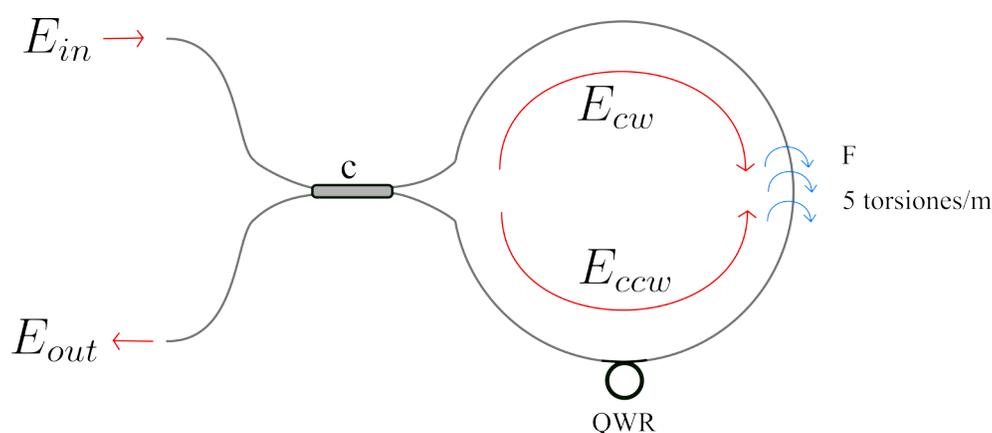


Figura 2.13: NOLM desbalanceado en polarización.

Realizando ahora un análisis de la transmisión utilizando las matrices de Jones, las cuales asocian a cada elemento una matriz que representa los cambios en el vector del estado de polarización, podemos simular el comportamiento del dispositivo. En la Tabla 2.1, se encuentran las matrices utilizadas para la simulación del interferómetro.

Tabla 2.1: Matrices de Jones de algunos elementos ópticos para entrada en polarización lineal.

Elemento óptico	Símbolo	Matriz de Jones
Placa retardadora de $\lambda/4$ analizada en sentido horario	QWR_{CW}	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$
Placa retardadora de $\lambda/4$ analizada en sentido antihorario	QWR_{CCW}	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$
Fibra torcida analizada en sentido horario	F_{CW}	$\begin{bmatrix} e^{\frac{i3\beta LP_{in}}{4}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{i3\beta LP_{in}}{4}} \end{bmatrix}$
Fibra torcida analizada en sentido antihorario	F_{CCW}	$\begin{bmatrix} e^{\frac{i(3+\text{sen}2\psi)\beta LP_{in}}{4}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{i(3-\text{sen}2\psi)\beta LP_{in}}{4}} \end{bmatrix}$

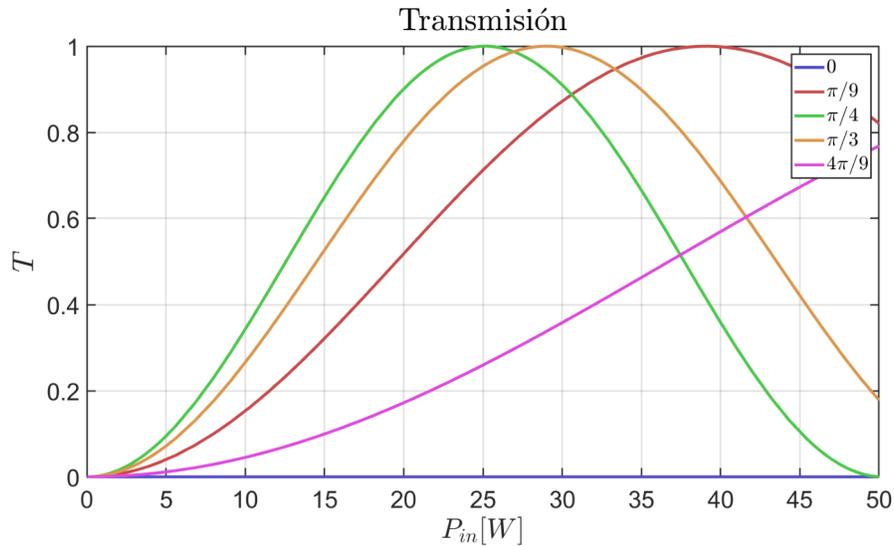


Figura 2.14: Transmisión del NOLM desbalanceado en polarización para diferentes valores del ángulo de polarización lineal a la entrada.

Es decir, variando el ángulo de las placas controladoras de polarización en el NOLM y del resto de la cavidad para controlar la entrada, podemos controlar la transmisión del dispositivo a distintas potencias y, por lo tanto, utilizarlo como absorbedor saturable para controlar el régimen del láser, lo cual hace inevitable pensar en un sistema de control para láseres pulsados de figura en ocho basados en polarización.

2.4. Teoría del control y sistemas dinámicos

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. La teoría de control moderna se basa en el análisis en el dominio temporal de los sistemas de ecuaciones diferenciales. La teoría de control moderna simplificó el diseño de los sistemas de control porque se

basa en un modelo del sistema real que se quiere controlar. Sin embargo, la estabilidad del sistema depende del error entre el sistema real y su modelo. Esto significa que, cuando el controlador diseñado basado en un modelo se aplica al sistema real, éste puede no ser estable [22].

La pregunta importante que debe responderse cuando se diseña un sistema autónomo, y de la que surge la teoría del control, es cómo conseguir que un sistema se comporte de cierta manera. La teoría de control es un marco matemático que nos brinda las herramientas para desarrollar sistemas autónomos.

Para comenzar, un sistema dinámico puede y se ve afectado por estímulos externos y, en general, podemos pensar que las entradas provienen de dos fuentes diferentes: las entradas de control que utilizamos para afectar al sistema intencionalmente, y las entradas no intencionales, las perturbaciones indeseables que afectan al sistema.

El estado del sistema cambia con el tiempo de acuerdo con las distintas entradas y surge la pregunta de si es posible determinar las entradas necesarias para generar una respuesta específica. Podemos realizar el ajuste sin conocer el estado actual del sistema; a esto se le conoce como un controlador de lazo abierto. El controlador recibe una entrada de referencia del estado deseado y aplica las entradas correspondientes al sistema para lograrlo. Sin embargo, este tipo de controladores tiene la desventaja de desconocer el estado actual del sistema, por lo que sufren desajustes en sistemas sensibles

al ruido. Por otra parte, el control retroalimentado toma como entrada del controlador la referencia deseada y la salida actual del sistema para generar las entradas requeridas.

Los sistemas de control por retroalimentación son los más comunes debido a que, en un sistema de control de lazo cerrado, la salida tiene efecto en la señal de entrada, modificándola para mantener la señal de salida en el valor requerido. Con un sistema de lazo abierto, la señal de salida está determinada sólo por el ajuste inicial. Cualquier cambio en el sistema o perturbaciones cambiarán su salida, sin compensar dicho cambio [23].

Otro de los requerimientos necesarios es el de realizar un modelado del sistema, utilizando conceptos de física y matemáticas para obtener las ecuaciones que describen el funcionamiento. Dependiendo de cómo se realice el modelo y de cómo se implemente el control es que obtenemos las distintas ramas de aplicaciones de la teoría del control. En la Figura 2.15 se muestra la configuración general de un sistema básico de lazo cerrado. Consta de los siguientes elementos:

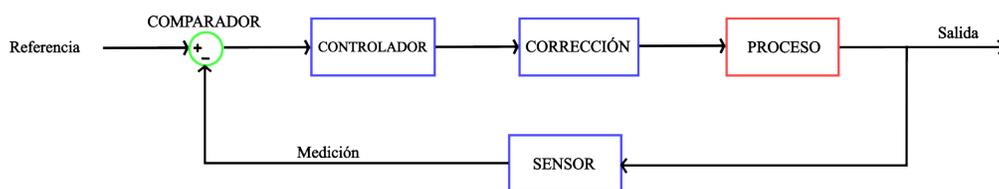


Figura 2.15: Elementos de un sistema de control de lazo cerrado.

- Elemento de proceso / Planta

El proceso es aquello que se está controlando, el sistema de interés.

- Elemento de corrección

El elemento de actuación produce un cambio en el proceso a fin de corregir o modificar la condición controlada. Es el actuador que modifica el estado del sistema.

- Elemento de medición / Sensor

El elemento de medición produce una señal relacionada con el estado de la variable del proceso que se controla. Convierte la señal de salida en una señal interpretable.

- Elemento comparador

Compara el valor deseado o de referencia $r(t)$ de la condición variable que se controla con el valor medido de lo que se produce $c(t)$ y genera una señal de error $e(t)$. Se puede considerar que suma la señal de referencia, positiva, a la señal del valor medido, que en este caso es negativa:

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2.8)$$

- Elemento de control/controlador

Dada una señal de error, el controlador decide qué acción llevar a cabo y modificar el sistema mediante los actuadores. Las acciones de control pueden ser sistemas alambrados, en cuyo caso la acción de control se define de manera permanente por la conexión entre los elementos; o bien, pueden ser sistemas programables, donde el algoritmo de control

se almacena en una unidad de memoria y se puede modificar con una reprogramación.

2.4.1. Tipos de control por retroalimentación

La ingeniería de control se ha expandido intensamente en las últimas décadas debido al avance de las tecnologías modernas y al desarrollo de nuevos sistemas, en particular sistemas inteligentes [24]. Es por ello por lo que la comunidad de control a lo largo de los años ha desarrollado numerosos tipos diferentes de controladores de retroalimentación.

Teoría del control clásica

Lineales y no lineales: Los más comunes son los controladores lineales y retroalimentación de estado completo que asumen que el comportamiento general del sistema que se controla es de naturaleza lineal o al menos muy aproximable al lineal. La estructura de control por retroalimentación más conocida y utilizada es el controlador proporcional integral-derivativo (PID), y, hasta finales del siglo pasado, este tipo de controlador se utilizaba para más del 90% de los sistemas de control prácticos [24]. Por otra parte, los controladores no lineales, como los controladores de encendido y apagado y los controladores de modo deslizante, son muy utilizados en la industria.

Teoría del control moderna

Robustos: El control robusto son las técnicas de control diseñadas específicamente para lidiar con las incertidumbres del sistema, así como con las perturbaciones.

Adaptativos: El control adaptativo se refiere a sistemas de control con controladores ajustables, es decir, los parámetros del controlador se adaptan o cambian de acuerdo con las modificaciones en la dinámica del sistema junto con las condiciones de este. Por ejemplo, dinámicas desconocidas, así como las incertidumbres y no linealidades de los parámetros. Caracterizado por utilizar controladores como la búsqueda de extremos y el control adaptativo de referencia de modelo, que se adaptan a los cambios en el sistema a lo largo del tiempo.

Óptimos: La teoría del control óptimo se refiere a técnicas que se basan en dos ideas fundamentales: la programación dinámica con el principio de optimalidad asociado y el principio del mínimo (máximo) de Pontryagin [25]. Es decir, el análisis se realiza sobre una función de error, y el controlador intenta equilibrar el rendimiento y el esfuerzo minimizando el error total.

Estocásticos: La clase de control estocástico se basa principalmente en las características del sistema que se va a controlar más que en las técnicas utilizadas. Los problemas de control estocástico tienen algún ruido aleatorio o perturbaciones en el modelo que los controladores deben tener en cuenta. Por lo tanto, el control estocástico se ocupa del control de sistemas aleatorios.

Predictivos: Los controladores predictivos utilizan un modelo del sistema dentro del controlador para simular cuál será el estado futuro y, por lo tanto, cuál debería ser la entrada de control adecuada para que ese estado futuro coincida con la referencia.

Inteligentes: El control inteligente se refiere a metodologías que utilizan técnicas de inteligencia artificial, las cuales pueden clasificarse en lógica difusa, redes neuronales, así como sintonización metaheurística de parámetros que incluyen algoritmos de optimización bioinspirados y evolutivos.

2.4.2. Estimación del estado

Como ya mencionamos, los controladores de retroalimentación requieren conocimiento del estado actual del sistema; sin embargo, surge el problema de la observabilidad, pues en realidad no podemos conocer el estado real del sistema ya que al medirlo introducimos ruido y el controlador reaccionará a este ruido también. La estimación del estado es, por lo tanto, otra área importante de la teoría de control y para la cual podemos usar distintos algoritmos, desde simplemente tomar la media de distintas mediciones, pasando por la implementación de filtros más complejos, hasta el uso de redes neuronales para predecir regímenes de operación.

2.5. Redes neuronales artificiales

Existen numerosas formas de definir a las redes neuronales. Estas son algunas de ellas [25]:

- Una forma de computación, inspirada en modelos biológicos.
- Un modelo matemático compuesto por un gran número de elementos procesales organizados en niveles.

- Un sistema de computación compuesto por un gran número de elementos simples, elementos de procesos muy interconectados, los cuales procesan información por medio de su estado dinámico como respuesta a entradas externas.
- Redes neuronales artificiales son redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples (usualmente adaptativos) y con organización jerárquica, las cuales intentan interactuar con los objetos del mundo real del mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico.

A continuación, se puede ver, en la Figura 2.16, un esquema de una red neuronal. La misma está constituida por neuronas interconectadas y arregladas en tres capas. Los datos ingresan por medio de la capa de entrada, pasan a través de la capa oculta y salen por la capa de salida. Cabe mencionar que la capa oculta puede estar constituida por varias capas.

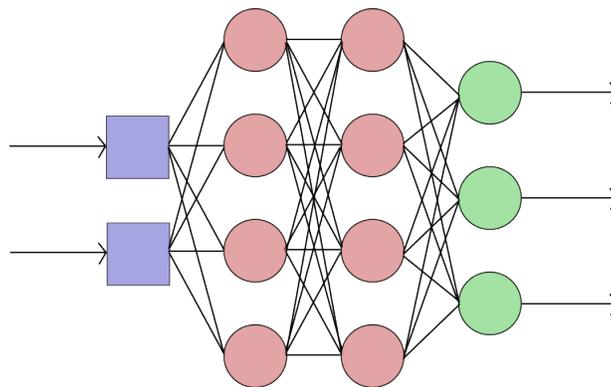


Figura 2.16: Ejemplo de una red neuronal totalmente conectada.

2.5.1. Conceptos generales

Una neurona toma los parámetros de entrada y los combina para entregar un valor a la salida. Cada valor de entrada x_i es multiplicado por una constante denominada peso W_i , la neurona suma todos los valores junto con un término independiente b , el resultado finalmente es pasado por una función de activación para determinar el valor de salida. En la Figura 2.17 se presenta la representación de una sola neurona.

La función de activación calcula el estado de actividad de una neurona; transformando la entrada global en un solo valor. Otra de las necesidades de la aplicación de la función de activación es agregar no linealidades al sistema, y así, al interconectar distintas neuronas, no sea un sistema equivalente a una sola neurona. Las funciones de activación más comúnmente utilizadas son: Lineal, ReLU, sigmoide y tangente hiperbólica.

La neurona, entonces, realiza la siguiente operación:

$$y_i = f \left(\sum_{k=1}^n W_k x_k + b_i \right) \quad (2.9)$$

donde: f es la función de activación elegida, n el número de entradas, i el número de la neurona, W_k el k -ésimo peso de la entrada x_k y el término independiente o bias b .

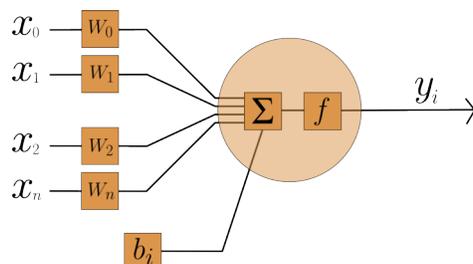


Figura 2.17: Representación de una simple neurona.

2.5.2. Aprendizaje

Los datos de entrada se procesan a través de la red neuronal con el propósito de lograr una salida; sin embargo, esta puede variar en un rango amplio dependiendo de los pesos de cada una de las neuronas. Una red neuronal se debe ajustar para poder calcular la salida correcta para cada vector de entrada; este proceso se denomina aprendizaje o proceso de entrenamiento o acondicionamiento y el conjunto de datos sobre el cual se ajusta este proceso se denomina conjunto de datos de entrenamiento.

Durante el proceso de aprendizaje, los pesos de las conexiones de la red sufren modificaciones; por lo tanto, se puede afirmar que este proceso ha terminado cuando los valores de los pesos permanecen estables.

Hay dos métodos de aprendizaje importantes que pueden distinguirse:

- Aprendizaje supervisado: Cuando sabemos de antemano las salidas o grupos que debe distinguir la red.
- Aprendizaje no supervisado: Cuando no se tienen restricciones sobre una salida específica.

2.5.3. Redes neuronales en sistemas de control

Las redes neuronales tienen diversas aplicaciones en los sistemas de control [26]:

- Sistemas no lineales. Las redes neuronales se utilizan en sistemas no lineales debido a su capacidad de aproximarse a estas soluciones.
- Procesamiento distribuido en paralelo. Las redes neuronales tienen una estructura fundamentalmente paralela lo cual el favorece el grado de tolerancia a fallos respecto a esquemas convencionales, además del procesamiento general rápido y facilidad de implementación en hardware.
- Aprendizaje y adaptación. Las redes se entrenan utilizando registros de datos anteriores del sistema en estudio. Una red adecuadamente entrenada tiene la capacidad de generalizar cuando se le presentan entradas que no aparecen en los datos de entrenamiento.
- Sistemas multivariantes. Las redes neuronales procesan naturalmente múltiples entradas y salidas, por lo que son fácilmente aplicables a sistemas multivariantes.
- Control Predictivo: Las redes neuronales pueden ser entrenadas para modelar el comportamiento de un sistema complejo. Y una vez entrenado se utiliza como modelo de referencia para predecir la salida futura del sistema dada la entrada actual y poder calcular de manera más precisa el ajuste que se debe realizar en el instante siguiente.
- Control Adaptativo: Las redes neuronales pueden ser diseñadas para ajustar los parámetros del controlador en tiempo real en respuesta a

cambios en las dinámicas del sistema mejorando su robustez y su adaptabilidad.

- Control por refuerzo (Reinforcement Learning): En esta rama, las redes neuronales se utilizan para funcionar como el controlador en sí mismo, realizando el ajuste óptimo a través de técnicas de aprendizaje por refuerzo, o algoritmos genéticos.

Desde el punto de vista de la teoría del control, la capacidad de las redes neuronales para tratar con sistemas no lineales y su aplicación en sistemas adaptativos es quizás la más significativa [24]. La gran diversidad de sistemas no lineales es la razón principal por la que aún no se ha desarrollado una teoría sistemática y generalmente aplicable para el diseño de controles no lineales. Existe una variedad de métodos “tradicionales” para el análisis y síntesis de controladores no lineales para clases específicas de sistemas no lineales: métodos de plano de fase, técnicas de linealización y funciones de descripción son tres ejemplos [25]. Sin embargo, es la capacidad de las redes neuronales para modelar sistemas no lineales, la característica que se explota más fácilmente en la síntesis de controladores no lineales.

Por otra parte, es inevitable pensar que, sea cual sea el enfoque de control que se desee implementar en un sistema, se requerirán también el conjunto de actuadores y diseños mecánicos para manipular y detectar las dinámicas, y muchas veces deben ser diseñados a la par del sistema.

2.6. Diseño CAD

El Diseño Asistido por Computadora (Computer-Aided Design) (CAD) es una herramienta fundamental en el ámbito del diseño de actuadores y sistemas de control, ya que permite diseñar actuadores que cumplan con características específicas y funcionen de manera óptima. Además de la capacidad de realizar no solo representaciones visuales del objeto, sino también análisis y simulaciones sobre el comportamiento del mecanismo.

El software para el diseño CAD permite el desarrollo de diseños tridimensionales (3D) a partir de los cuales pueden producirse las vistas convencionales en dos dimensiones con dimensionamiento automático. Las trayectorias de las herramientas pueden generarse a partir de los modelos 3D y, en algunos casos, las partes pueden crearse directamente desde una base de datos 3D mediante el uso de un método para la creación rápida de prototipos y manufactura [27].

La manufactura aditiva es una de las alternativas más populares para el diseño de prototipos en ingeniería. El principio básico de esta tecnología es que un modelo, generado inicialmente mediante un sistema de diseño CAD 3D, se puede fabricar directamente sin necesidad de planificación del proceso. La clave del funcionamiento de la fabricación aditiva es que las piezas se fabrican añadiendo material en capas; cada capa es una sección transversal delgada de la pieza derivada de los datos CAD originales [28]. La impresión en 3D, una de las técnicas de manufactura aditiva, ha adquirido popularidad en los últimos años, debido a la reducción de costos en la fabricación de im-

presoras y a la variedad de modelos que se han fabricado.

Otra de las herramientas utilizadas para la fabricación de prototipos es el uso de corte láser. En el cual, el diseño CAD debe descomponerse en las vistas en dos dimensiones, y posteriormente ser cortado en algún material con un cierto espesor para poder formar el diseño. La variedad de cortadoras láser y su rapidez para procesar materiales las convierte en una alternativa llamativa para el diseño de prototipos.

Después de haber hablado del principio de operación de un láser pulsado, la teoría del control y del diseño asistido por computadora para el desarrollo de prototipos. En el siguiente capítulo se describirá el desarrollo de un sistema de control para el autoencendido de un láser pulsado de fibra óptica en figura en ocho.

2.7. Referencias del capítulo

- [1] Filoteo-Razo, J. D. (2021). Análisis y desarrollo de un filtro DMZI-SI aplicado a la obtención de una fuente láser de múltiples longitudes de onda y conmutable. Tesis de doctorado. Universidad de Guanajuato.
- [2] Herd, R. M., Dover, J. S., y Arndt, K. A. (1997). Basic laser principles. *Dermatologic clinics*, Jul;15(3):355-72. *Lasers in Dermatology*.
- [3] Ibarra Villalón, H. E. (2022). Estudio numérico de la generación y dinámicas de pulsos múltiples en un láser de fibra de amarre de modos pasivo. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma Metropolitana.
- [4] Ngo, N. Q. (2018). Ultra-fast fiber lasers: principles and applications with MATLAB® models. CRC Press.
- [5] Haus, H. A. (2000). Mode-locking of lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(6), 1173-1185.
- [6] Sibbett, W., y Taylor, J. (1984). Passive mode locking in the near infrared. *IEEE journal of quantum electronics*, 20(2), 108-110.
- [7] Kunimatsu, D., Arahira, S., Kato, Y., y Ogawa, Y. (1999). Passively mode-locked laser diodes with bandgap-wavelength detuned saturable absorbers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(11), 1363-1365.
- [8] Haus, Haus, H. A., Fujimoto, J. G., e Ippen, E. P. (1991). Structures for additive pulse mode locking. *JOSA B*, 8(10), 2068-2076.
- [9] H. A., e Ippen, E. P. (1991). Self-starting of passively mode-locked lasers. *Optics letters*, 16(17), 1331-1333.

-
- [10] Haus, H. A., Fujimoto, J. G., e Ippen, E. P. (1992). Analytic theory of additive pulse and Kerr lens mode locking. *IEEE Journal of quantum electronics*, 28(10), 2086-2096.
- [11] Duling, I. N. (1991). Subpicosecond all-fibre erbium laser. *Electronics Letters*, 6(27), 544-545.
- [12] Tamura, K., Haus, H. A., e Ippen, E. P. (1992). Self-starting additive pulse mode-locked erbium fibre ring laser. *Electronics Letters*, 24(28), 2226-2228.
- [13] Morgner, U., Kärtner, F. X., Cho, S. H., Chen, Y., Haus, H. A., Fujimoto, J. G., ... y Tschudi, T. (1999). Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lens mode-locked Ti: sapphire laser. *Optics letters*, 24(6), 411-413.
- [14] He, J., y Chan, K. T. (2002). All-optical actively modelocked fibre ring laser based on cross-gain modulation in SOA. *Electronics Letters*, 38(24), 1504-1505.
- [15] Shan, X., Cleland, D., y Ellis, A. (1992). Stabilising Er fibre soliton laser with pulse phase locking. *Electronics Letters*, 28(2), 182-184.
- [16] Nakazawa, M., Yoshida, E., y Tamura, K. (1996). 10 GHz, 2 ps regeneratively and harmonically FM mode-locked erbium fibre ring laser. *Electronics Letters*, 32(14), 1285-1287.
- [17] Nakazawa, M., Yoshida, E., y Tamura, K. (1997). Ideal phase-locked-loop (PLL) operation of a 10 GHz erbium-doped fibre laser using regenerative modelocking as an optical voltage controlled oscillator. *Electronics Letters*, 33(15), 1318-1320.

-
- [18] Abedin, K. S., Hyodo, M., y Onodera, N. (2001). Active stabilization of a higher-order mode-locked fiber laser operating at a pulse-repetition rate of 154 GHz. *Optics Letters*, 26(3), 151-153.
- [19] Gutiérrez-Zainos, F., Ibarra-Escamilla, B., Kuzin, E. A., Ruíz-Corona, U., y Pottiez, O. (2005). Investigación experimental del espejo de lazo óptico no lineal con un acoplador simétrico y una placa retardadora de un cuarto de onda en el lazo. *Revista mexicana de física*, 51(6), 574-579.
- [20] Filoteo, J. (2017). Láser pulsado de fibra óptica dopado con Er/Yb utilizando amarre de modos. Tesis de maestría. Universidad de Guanajuato.
- [21] Hernández, J. (2012). Estudio teórico-experimental de un láser de fibra de figura ocho y su aplicación en la generación de supercontinuo en fibras ópticas; estudio de la generación de supercontinuo en fibras micro-estructuradas a partir de pulsos de nanosegundos. Tesis de doctorado. Centro de Investigaciones en Óptica.
- [22] Ogata, K. (2003). Ingeniería de control moderna. Pearson Educación.
- [23] Bolton, W. (2017). Mecatrónica: sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Alfaomega.
- [24] Blondin, M. J., Pardalos, P. M., y Sáez, J. S. (Eds.). (2019). Computational intelligence and optimization methods for control engineering.
- [25] Guinot, P. y Orti, M. (2013) Introducción a las redes neuronales aplicadas al control industrial.
- [26] Hunt, K. J., Sbarbaro, D., Żbikowski, R., y Gawthrop, P. J. (1992). Neural networks for control systems - a survey.

-
- [27] Budynas, R. G. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.
- [28] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., y Khorasani, M. (2021). Additive manufacturing technologies (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.

Capítulo 3

Diseño de módulos de control

En este capítulo se exponen los elementos que conforman el sistema de control. Además, se describen los dispositivos que se utilizan en cada etapa y su diseño. Finalmente, se presenta la implementación del módulo de control.

3.1. Proceso / planta

El sistema de estudio en esta tesis es un F8L, un láser pulsado de fibra óptica.

3.1.1. Sistema láser

El láser utiliza como fuente de bombeo un diodo láser con salida de fibra óptica de la marca Focuslight (FL-DLS03-FCMSE55-I-25-976-5). Con ajuste de corriente de hasta 10 A, una emisión centrada en 979.69 nm, ancho espectral de 3.94 nm y una potencia máxima de 25 W.

El medio activo del sistema son 1.6 m de fibra óptica de doble revestimiento de Er^{3+} e Yb^{3+} de la marca NUFERN modelo MM-EYDF-12/130-HE, la cual contiene iones de erbio e iterbio, lo que permite obtener el espectro de ganancia característico del erbio con la ventaja de requerir más energía para alcanzar la saturación, lo cual permite operar en regímenes de más alta potencia.

El lazo de fibra se cierra en forma de anillo con ayuda de acopladores de fibra, para introducir la señal de bombeo y recuperar una muestra de la señal láser; y un aislador óptico, para utilizar únicamente un sentido en el camino óptico y evitar reflexiones dañinas.

El absorbedor saturable para controlar el estado continuo o pulsado del láser es un NOLM, conformado, como vimos anteriormente, por fibra óptica torcida, un acoplador 50/50 y placas controladoras de la polarización. Dándole al láser la figura en ocho.

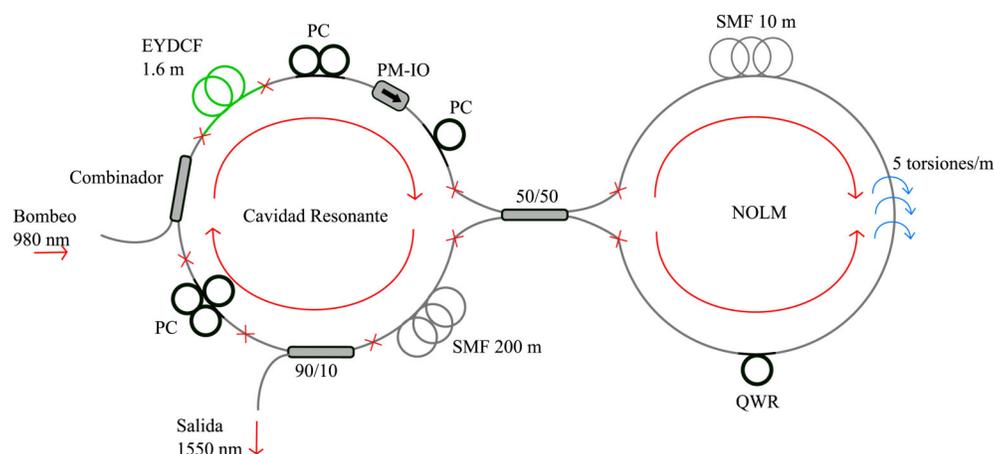


Figura 3.1: Diagrama del sistema F8L.

3.1.2. Referencia

La señal de referencia, o el estado que queremos lograr, es una señal pulsada. Los pulsos son convertidos de ópticos a eléctricos con el fotodetector DET08 de Thorlabs, tienen una frecuencia de repetición de ~ 950 kHz, una amplitud de ~ 50 mV y una duración de pulso global de ~ 10 ns formado por NLPs con una duración del orden de picosegundos. El trazo de autocorrelación de la señal pulsada indica que los pulsos están conformados por subpulsos, pues se aprecia un doble pedestal característico de los NLPs [1].

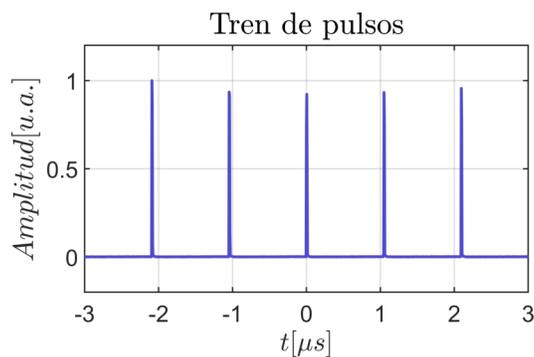


Figura 3.2: Señal pulsada a la salida del F8L.

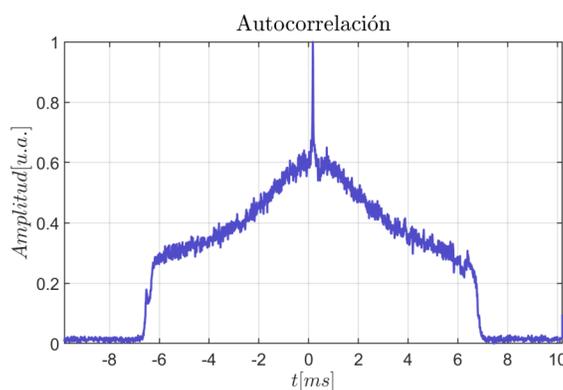


Figura 3.3: Trazo de autocorrelación de la señal pulsada.

3.2. Elemento de corrección

Para modificar el estado del sistema podemos manipular distintos parámetros, los principales son la corriente del láser de bombeo, el estado de polarización y la transmisión del NOLM, en este trabajo nos centramos en la manipulación de las placas controladoras de polarización para modificar la transmisión del absorbedor saturable.

3.2.1. Placas controladoras de polarización

Los controladores de polarización de fibra de Thorlabs utilizan birrefringencia inducida por curvatura y torsión producida al envolver la fibra alrededor de dos o tres carretes para crear placas de onda independientes que alterarán la polarización de la luz transmitida en una fibra monomodo. El eje rápido de la fibra está en el plano de la bobina, lo que permite ajustar un estado de polarización de entrada arbitrario girando las placas [2].



Figura 3.4: Placas controladoras de polarización manuales de Thorlabs.

La cantidad de birrefringencia inducida en la fibra es función del diámetro del revestimiento de la fibra, el diámetro de la placa, el número de bucles de fibra por carrete y la longitud de onda de la luz [3]. El eje rápido de la fibra, que está en el plano de la placa, se ajusta con respecto al vector de polarización transmitido girando las placas para torcer la fibra. Para transformar un estado de polarización de entrada arbitrario en un estado de polarización de salida arbitrario, se utiliza una combinación de tres placas (una placa de cuarto de onda, una placa de media onda y una placa de cuarto de onda).

El retardo de cada paleta es el desfase inducido entre las componentes del campo eléctrico, lo que modifica el estado de polarización; podemos expresar este desfase en radianes o en longitudes de onda, por ejemplo, un retardo de media onda o 0.5 ondas ($\frac{\lambda}{2}$) es equivalente a un retardo de π rad, y un retardo de un cuarto de onda o 0.25 ondas ($\frac{\lambda}{4}$) es equivalente a un retardo de $\frac{\pi}{2}$ rad. El retardo se puede estimar a partir de la siguiente ecuación:

$$\varphi(\text{Radianes}) = \frac{2\pi^2 a N d^2}{\lambda D} \quad (3.1)$$

$$\varphi(\text{Ondas}) = \frac{\pi a N d^2}{\lambda D} \quad (3.2)$$

Donde, φ es el retardo, a es una constante (0.133 para fibra de sílice), N es el número de bucles o vueltas, d es el diámetro del revestimiento de la fibra, λ es la longitud de onda y D es el diámetro del lazo.

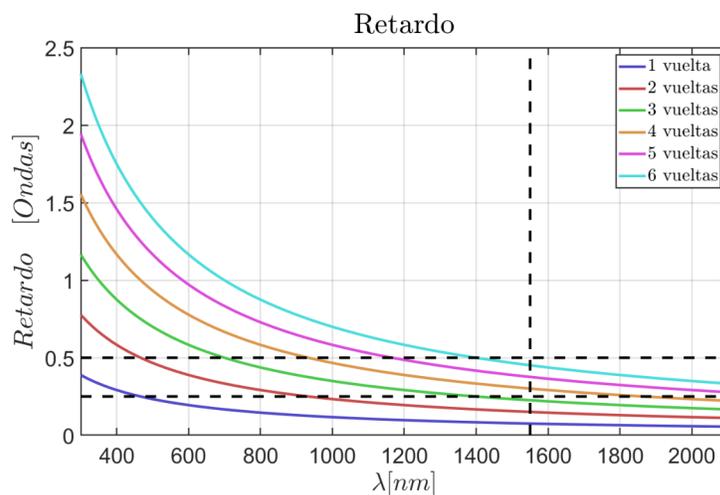


Figura 3.5: Gráfica del retardo inducido por placa.

Recientemente, Thorlabs lanzó a la venta sus primeros controladores motorizados. Los cuales también están basados en placas que utilizan birrefringencia. Se alimentan a través de USB, que se conecta a una computadora para el control. La rotación de las placas está impulsada por el paquete de software Kinesis de Thorlabs [3].



Figura 3.6: Placas controladoras de polarización motorizadas de Thorlabs.

El uso de estas placas conlleva grandes limitaciones. El principal problema es el rango de ángulos que puede tomar cada placa, pues ninguno de los modelos permite un giro libre de 360° perdiendo regiones que podrían ser de interés. Otro de los problemas es la falta de un diseño modular; si se requiere la manipulación de más placas motorizadas, no es posible conectarlas de manera sencilla con un mismo software. Es por ello por lo que, en este estudio, se diseñó un nuevo prototipo de placas controladoras de polarización.



Figura 3.7: Prototipo de placas controladoras de polarización (Versión 1).

Las principales diferencias con las placas comerciales de Thorlabs son: Libertad de movimiento de 360° , diseño modular que permite adaptar un número variado de placas consecutivas, control de movimiento mediante motor a pasos y engranajes intercambiables para mayor precisión.

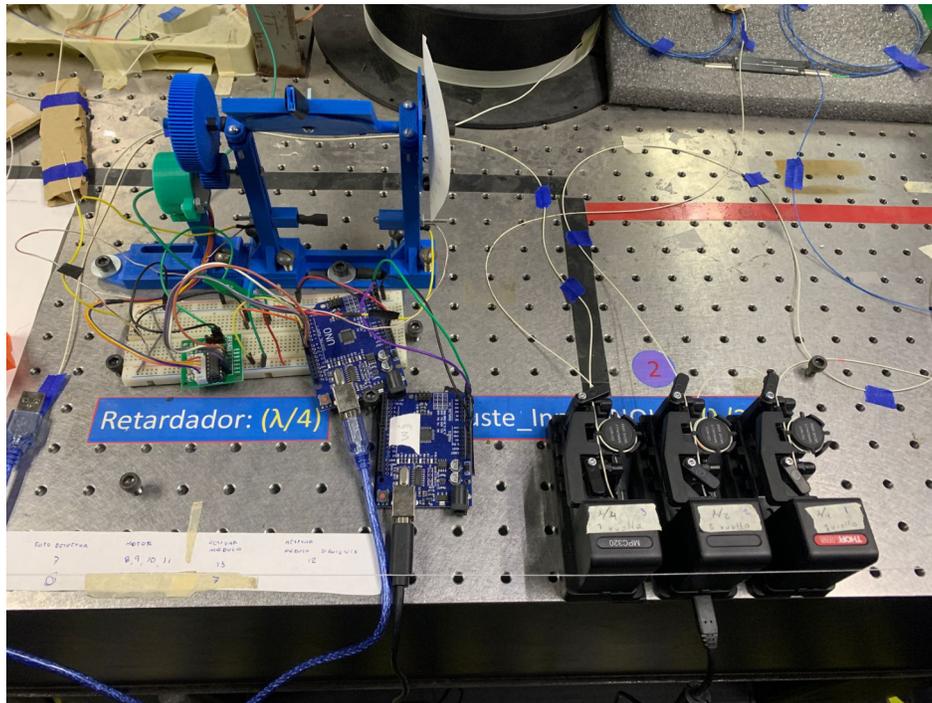


Figura 3.8: Prototipo de placas controladoras de polarización (Versión 2).

El diseño de las piezas de la placa se realizó en distintos softwares, como FreeCAD, AutoCAD, MatLab y Shapr3D (Ver diseños en apéndice B). Para la fabricación se utilizaron impresoras 3D para las piezas de plástico, se utilizó Ácido poliláctico (PLA) con las impresoras Makerbot Replicator+ y Ultimaker 2+ y para las piezas de acrílico y MDF fueron utilizadas las cortadoras láser de CamFIVE CFL-CMA1612T y la Atomstack X20 Pro.

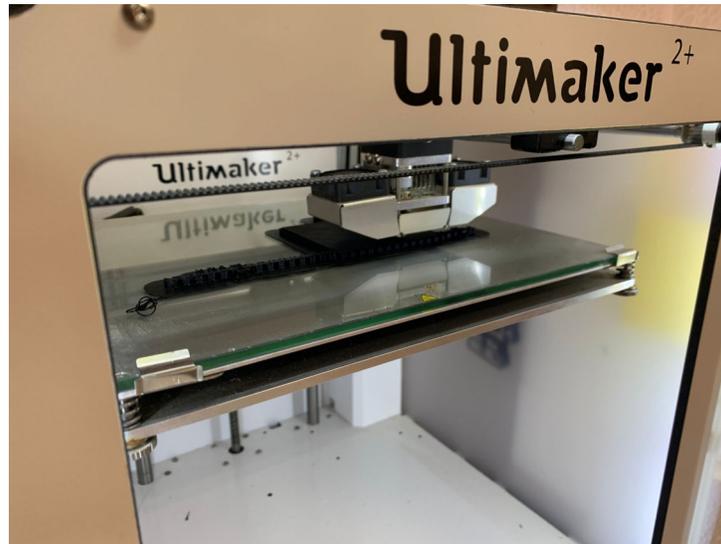


Figura 3.9: Impresión 3D de la placa del controlador de polarización.

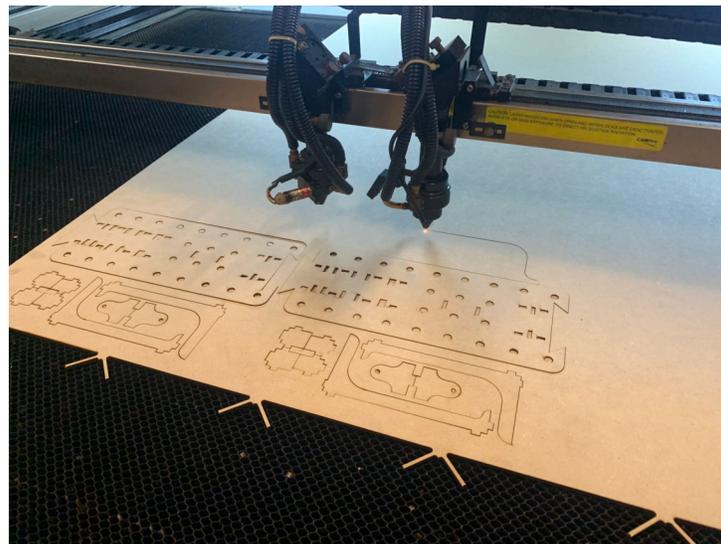


Figura 3.10: Corte láser en MDF de las piezas de soporte del controlador de polarización.

3.2.2. Motor a pasos

Para realizar el ajuste del ángulo de la placa fueron utilizados motores a pasos, el motor 28BYJ-48 junto con el controlador basado en el chip ULN2003A es ideal debido a su pequeño tamaño, con 64 pasos por vuelta y un reductor de 1/64 nos da un total de 4076 pasos por vuelta sin contar la reducción por engranajes, lo cual aumenta la resolución.

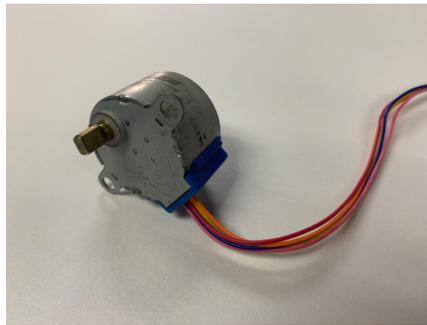


Figura 3.11: Motor a pasos 28BYJ-48 para modificar la posición de la placa.

También se examinó la idea de utilizar servomotores, sin embargo, son menos precisos. El motor a pasos es más confiable y tiene el torque necesario para mover la placa sin problemas.

3.2.3. Engranajes

Uno de los inconvenientes del movimiento de la placa es que la fibra cruza a lo largo del eje de giro, por lo que no es posible acoplar el eje del motor directamente; por lo que se requiere de un sistema de engranajes que transfiera el movimiento.

Los engranajes diseñados son un sistema piñón-corona de engranajes planos, fijando la distancia a la que se requerían los ejes y la razón de vueltas entre el piñón y la corona. Se utilizó el método de la involuta para realizar el perfil, para posteriormente ser cortado en la máquina láser. Se diseñaron mediante programación parametrizada en MatLab, por lo que simplemente es cuestión de cambiar la razón entre los engranajes para generar un nuevo perfil.

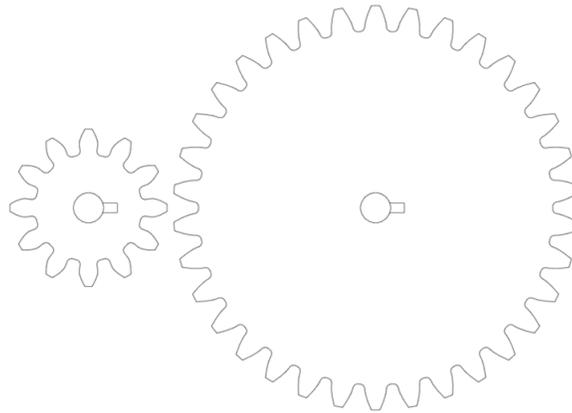


Figura 3.12: Perfil de los engranajes reductores para transmisión de movimiento.

3.2.4. Sistema de posicionamiento

El motor a pasos por sí solo ya es confiable para el movimiento; sin embargo, para poder controlar y monitorizar el ajuste se optó por realizar un sistema de control, utilizando un potenciómetro de 10 vueltas para monitorizar constantemente el ángulo en el cual se encontraba y ser más robusto al momento de apagar y encender el sistema.

Para calibrar el potenciómetro y marcar una referencia de 0° y 360° se utilizan unos detectores de posición basados en fototransistores, para marcar la zona de inicio y fin.

Ahora, se cuenta con unas placas motorizadas con mayor libertad y precisión en el posicionamiento.

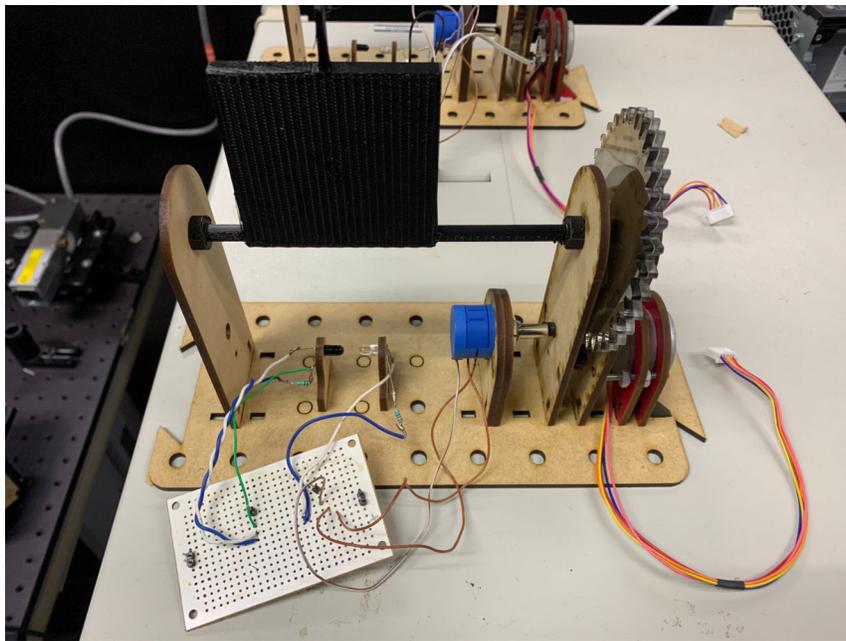


Figura 3.13: Prototipo de placas controladoras de polarización (Versión 4).

El diseño propuesto de placas controladoras de polarización es superior al diseño recientemente lanzado por Thorlabs, pues no solo permite el movimiento motorizado, sino que también es un diseño modular que permite la conexión de un número indistinto de placas. Además, la sensibilidad variable gracias al sistema de engranajes intercambiables y la libertad de giro de 360° permiten un mejor estudio de las regiones.

3.3. Sensor

Para medir el estado del sistema y retroalimentar el control podemos utilizar un instrumento de medición, como el OSA, donde un amarre de modos se observa al presenciar fenómenos ópticos no lineales que ensanchen el espectro. Otro método consistiría en utilizar un arreglo de circuitos integrados lineales para procesar la señal de salida del fotodetector, sin embargo, debido a la frecuencia de repetición de los pulsos y a su poca duración, no es una alternativa viable.

En este trabajo se utilizó el osciloscopio programable de Keysight MSOX6004A, conectado a un CPU ejecutando LabVIEW para enviar los datos correspondientes. Es el elemento ideal como sensor, debido a que podemos programarlo para que envíe señales con datos como la amplitud o el ancho del pulso o cualquier otra medida sobre las señales, lo cual puede ser de utilidad si se desea un régimen específico.



Figura 3.14: Osciloscopio programable de Keysight MSOX6004A.

3.3.1. LabVIEW

NI LabVIEW es un entorno de programación gráfica de la empresa National Instruments (NI), que es utilizado para el desarrollo de sistemas de pruebas, con un enfoque intuitivo para la programación, conectividad con cualquier instrumento e interfaces de usuario completamente integradas [4].

El entorno de programación LabVIEW simplifica la integración de hardware para aplicaciones de ingeniería, ya que es posible adquirir datos desde hardware de NI y de terceros.



Figura 3.15: Interfaz en LabVIEW para la detección de la amplitud de pulsos.

3.4. Controlador

Para el dispositivo encargado de interpretar la señal del sensor y de modificar el actuador utilizamos un microcontrolador Arduino UNO; cada placa cuenta con un microcontrolador esclavo encargado de calibrar y controlar el ángulo de posicionamiento, y el controlador principal o maestro es el encargado de leer los datos del sensor, enviar los ángulos de posicionamiento a cada esclavo y desplegar los datos en una interfaz principal.

3.4.1. Arduino

Arduino es un microcontrolador ampliamente utilizado tanto por aficionados como por académicos de la electrónica para el desarrollo de dispositivos y aplicaciones gracias a su facilidad de implementar código y circuitos, debido a que es uno de los dispositivos que cuentan con interfaces programables y altamente compatibles con diferentes tipos de sensores.



Figura 3.16: Microcontrolador Arduino UNO para controlar el movimiento de las placas controladoras de polarización.

3.4.2. Comunicación I2C

Para el envío y la recepción de datos entre los microcontroladores utilizamos el protocolo I2C, ya que permite una sencilla conexión entre varios dispositivos esclavos y un maestro. Para la comunicación del maestro con la interfaz gráfica utilizaremos sencillamente el protocolo UART.

3.5. Visual Studio

Para la interfaz gráfica utilizamos el IDE de Visual Studio, un IDE completo para desarrolladores de C++ en Windows con amplia variedad de herramientas y características [5]. Al inicio del desarrollo, se pensó utilizar nuevamente LabVIEW; sin embargo, la capacidad de C de ser un lenguaje compilado y de Visual Studio de generar un archivo ejecutable en prácticamente cualquier entorno de Windows favoreció su elección, pues podría funcionar independientemente del sistema de retroalimentación y funcionar de manera similar a los productos comerciales. La interfaz (Figura 3.17) consiste en tres partes: la primera despliega los datos de posicionamiento de las placas controladoras de polarización y el estado actual del láser, la segunda parte se utiliza para controlar de manera manual las placas y posicionarlas en un ángulo fijo deseado, y la tercera parte permite realizar barridos de ángulos en búsqueda de regiones de amarre.

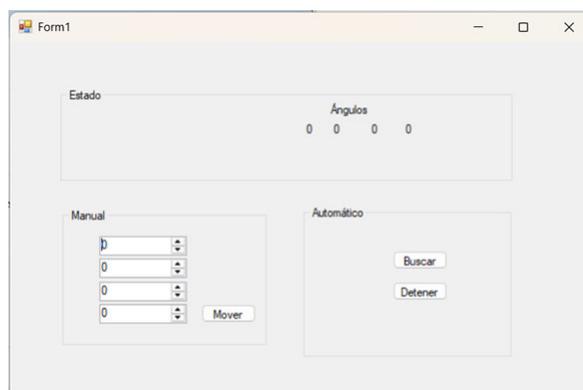


Figura 3.17: Interfaz en Visual Studio.

3.6. Algoritmo de posicionamiento

Interconectado cada elemento conformamos el sistema de control (Figura 3.18) para el autoencendido, caracterización y manipulación del F8L.

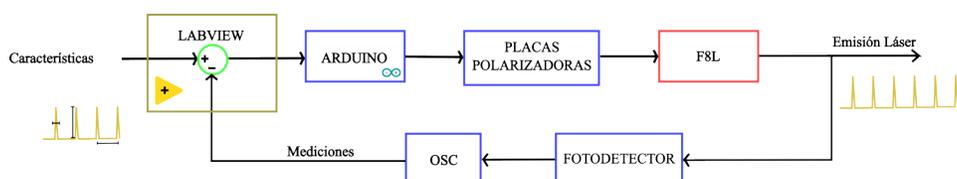


Figura 3.18: Diagrama del sistema de control.

Para la búsqueda de regiones de amarre podemos realizar un control manual en lazo abierto o un control automático en lazo cerrado. En el control manual, seleccionamos los ángulos a los cuales deseamos mover cada placa desde la interfaz en Visual Studio; los datos son enviados a través del Arduino maestro a cada una de las placas, el Arduino esclavo recibe el dato y posiciona la placa corroborando el ajuste con un sensor potenciómetro para el ángulo y fotodetectores para el inicio y fin de carrera.

El sistema en lazo cerrado busca una región de amarre, el osciloscopio programado envía una señal de 0 a 5 V dependiendo de la amplitud de los pulsos detectados y si estos logran sobrepasar un umbral, detenemos el movimiento de las placas. Aquí, la retroalimentación se realiza únicamente con la amplitud de la señal, sin embargo, podemos agregar otras características, pues el osciloscopio es capaz de realizar múltiples mediciones, siendo las principales la amplitud, el ancho del pulso y la frecuencia de repetición, por lo que es posible realizar un control más allá del autoencendido del láser para realizar la búsqueda de regímenes de operación (Ver figura 3.19).

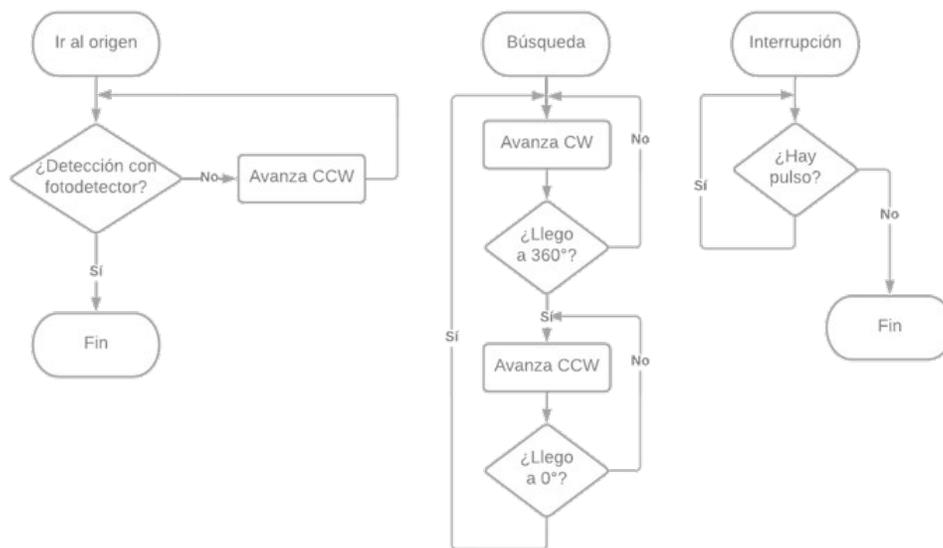


Figura 3.19: Diagrama de flujo del algoritmo de control.

3.7. Estimación de las regiones de operación

Para facilitar la búsqueda de regiones de operación del láser podemos realizar una caracterización apoyándonos del control manual en lazo abierto, realizando un barrido automático de una de las placas y guardando el estado del láser en esas características. En la Figura 3.20, se presenta una gráfica de las regiones de operación variando la placa principal del arreglo y la corriente de bombeo; las regiones en rojo son emisiones continuas, las verdes emisiones pulsadas y las azules, regiones en las que aparecen los pulsos, pero de manera inestable.

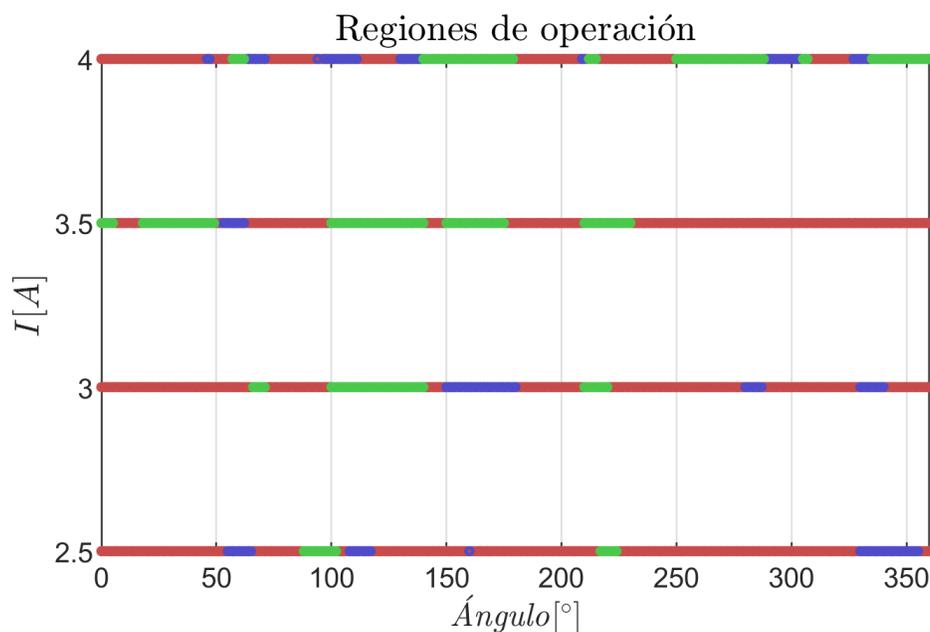


Figura 3.20: Regiones de operación del láser (Rojo: Emisión continua, Azul: Emisión quisi-estable, Verde: Emisión pulsada estable).

Una de las dificultades de realizar la caracterización de dispositivos de fibra óptica que dependen de la polarización es su repetibilidad y reproducibilidad. Al ser un sistema multivariable y sensible a perturbaciones como la temperatura [6], y a torsiones que pueda tener el movimiento de la fibra debido a birrefringencia inducida [7], se dificulta el asegurar unas mismas condiciones.

El uso de redes neuronales para eficientizar la búsqueda de regímenes de operación es una alternativa viable, ya que trata de aproximar el comportamiento no lineal del sistema. Pese a que el sistema láser es simulable (ver apéndice C) y podríamos utilizar la simulación para localizar las regiones, esto es inviable, debido a la naturaleza de los pulsos de ruido, ya que requieren de varios ciclos de simulación para aproximarse a la respuesta real del sistema. Es por ello por lo que las redes neuronales son una opción más atractiva.

Diseñamos un perceptrón multicapa (Figura 3.21) el cual recibe como parámetros de entrada los datos obtenidos de la caracterización, los ángulos de posicionamiento y la corriente de bombeo; la salida indicaría el régimen de operación del láser. En la Figura 3.22 podemos ver las regiones interpoladas por la red. Aquellas en azul oscuro son emisiones continuas, las amarillas emisiones pulsadas y las cian, regiones en las que aparecen los pulsos, pero de manera inestable.

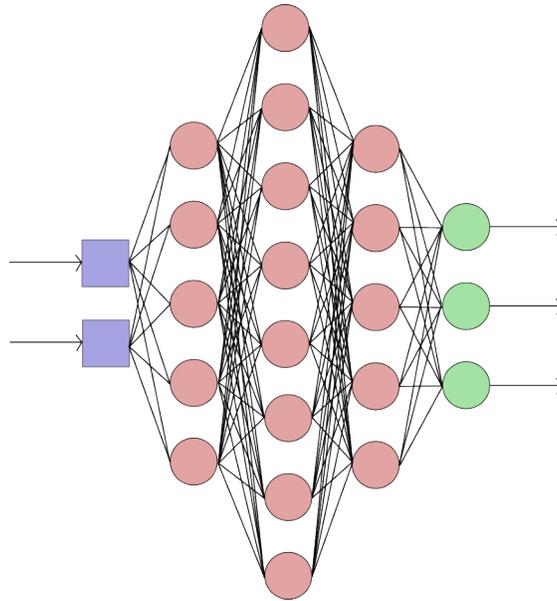


Figura 3.21: Arquitectura de la red neuronal propuesta.

Para solucionar el problema de las condiciones iniciales no basta con predecir el régimen de operación, es necesario corregir el desfase que se genera en las regiones a lo largo del tiempo debido a variaciones en el sistema. En la Figura 3.23 se muestra cómo varían las regiones a lo largo de 7 días, y cómo se van desfasando. Las regiones con amplitud en 0 son emisiones continuas, las regiones con amplitud en 1 son regiones pulsadas estables. El sistema debe realizar un primer barrido para ubicar las regiones, calcular el desfase respecto al mapa de caracterización obtenido con redes neuronales y, posteriormente, enfocar la búsqueda de regiones en las zonas de interés.

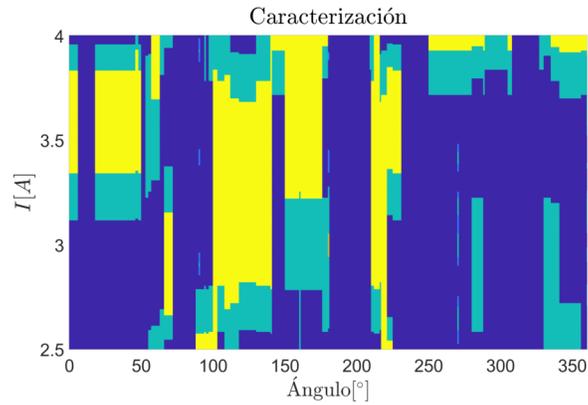


Figura 3.22: Regiones de operación del láser interpoladas con red neuronal.

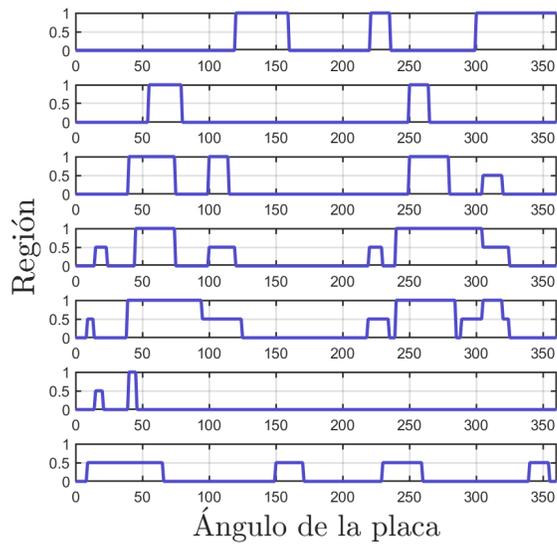


Figura 3.23: Desfase entre las zonas de amarre a lo largo de días.

Ahora que se ha explicado el desarrollo del sistema de control basado en polarización, en el siguiente capítulo se presentan las pruebas y resultados de la implementación del sistema.

3.8. Referencias del capítulo

- [1] Lauterio-Cruz, J. P. (2017). Experimental study of the generation of high-energy noise-like pulses and their application to supercontinuum generation. Tesis de doctorado. Centro de Investigaciones en Óptica.
- [2] Thorlabs., Motorized Fiber Polarization Controllers, consultado en Motorized Fiber Polarization Controllers (thorlabs.com) el 21/10/23
- [3] Thorlabs, MPC320 - Motorized Fiber Polarization Controller for Ø900 µm Jacket Fiber, 3 Paddles, Ø18 mm, consultado en Thorlabs - MPC320 Motorized Fiber Polarization Controller for Ø900 µm Jacket Fiber, 3 Paddles, Ø18 mm (thorlabs.com) el 21/20/23
- [4] National Instruments. ¿Qué es NI LabVIEW?, consultado en <https://www.ni.com/es/shop/labview.html> el 08/12/24
- [5] Windows. ¿Qué es el IDE de Visual Studio?, consultado en <https://learn.microsoft.com/es-es/visualstudio/get-started/visual-studio-ide?view=vs-2022> el 08/12/2024
- [6] Elfaki, A. A. A., Elobaid, R. A., Elamin, A. A., y Abd-Alla, M. D. (2017). The effect of temperature and laser type on optical fiber temperature coefficient. *American Journal of Optics and Photonics*, 5(1), 1-5.
- [7] Smith, A. M. (1980). Birefringence induced by bends and twists in single-mode optical fiber. *Applied optics*, 19(15), 2606-2611.

Capítulo 4

Sistema de autoencendido del láser

En este capítulo se expone el funcionamiento del módulo de control para el autoencendido del láser. Se describirán las pruebas de estabilidad realizadas para el posicionamiento manual y automático. Finalmente, se presentan pruebas y resultados del sistema, evaluando su desempeño para el autoencendido induciendo perturbaciones al sistema.

4.1. Posicionamiento manual (Lazo abierto)

Las placas motorizadas de Thorlabs [1,2] ofrecen una alternativa a los controladores de polarización convencionales. Tienen una velocidad de respuesta fija de ~ 23 grados por segundo, y un ángulo de libertad de 160° . Existen dos modelos, con dos y tres placas; si se requiere un número diferente, no existe manera de controlarlas. Por otra parte, el diseño de nuestras placas contro-

ladoras de polarización es un diseño modular, que permite la conexión de diferentes placas sin problemas; además, los engranajes intercambiables permiten variar la sensibilidad y rapidez del ajuste, variando desde 72 grados por segundo hasta 7.2 grados por segundo según la sensibilidad del sistema lo requiera. Además de un mayor ángulo de libertad de 360°, lo que permite el estudio de más regiones.

A continuación, se presentan los resultados resumidos en una tabla (Con una razón de 2.5 en los engranajes de acoplamiento, puede variar para mejorar).

Tabla 4.1: Comparación de los dos sistemas de polarización de Thorlabs y nuestro sistema propuesto.

Características	Control Motorizado (Thorlabs)	Sistema propuesto
Rango	160°	360°
Resolución	0.1°	Hasta 0.02°
Velocidad	23°/s	Hasta 7.2°/s
Tiempo de posicionamiento	Hasta 7 s	Hasta 60 s

Al conectar cuatro módulos de placas no existe diferencia, el desempeño de un solo módulo es igual al de varios módulos, con la diferencia de que el tiempo de ajuste final es determinado por la placa que recorra mayor distancia. Además, de que la velocidad y resolución son ajustables con los engranajes intercambiables.

4.2. Posicionamiento automático (Lazo cerrado)

Para realizar la evaluación del sistema se realizó el siguiente arreglo experimental. Reemplazando cada etapa de polarización por un módulo de nuestro sistema de polarización. Manipulando en lazo abierto las placas secundarias y en lazo cerrado la placa principal del NOLM.

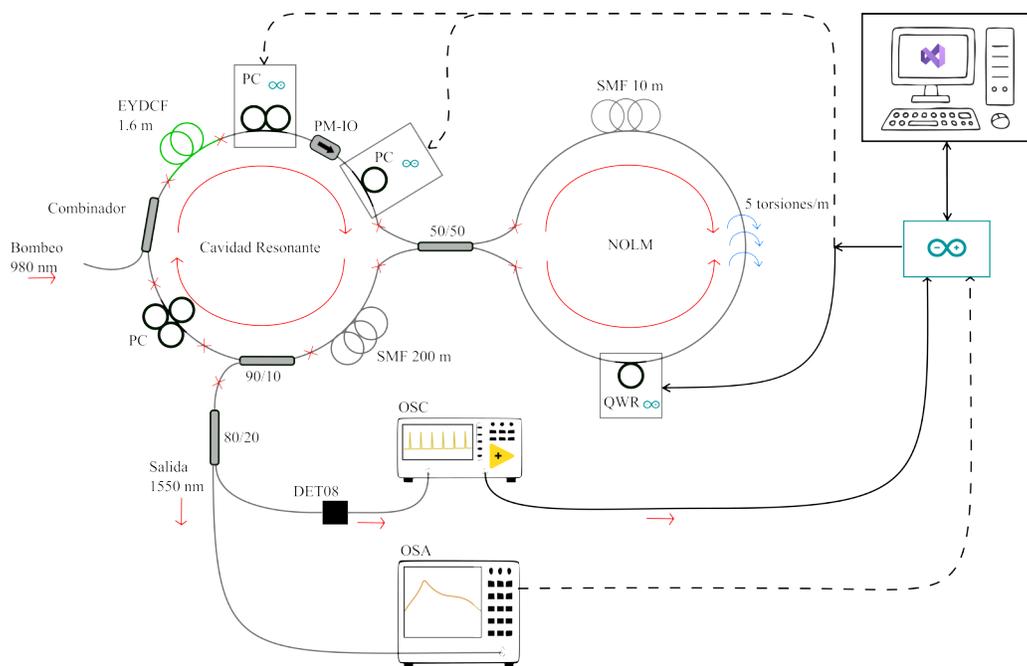


Figura 4.1: Arreglo experimental de F8L con sistema de control.

Se fijó la corriente de bombeo a distintos valores y se midió el tiempo que tardaba en encontrar una región de interés, y se repitió el experimento agregando perturbaciones en el sistema como torcer secciones de la fibra. A continuación se muestran algunos de los resultados más representativos.

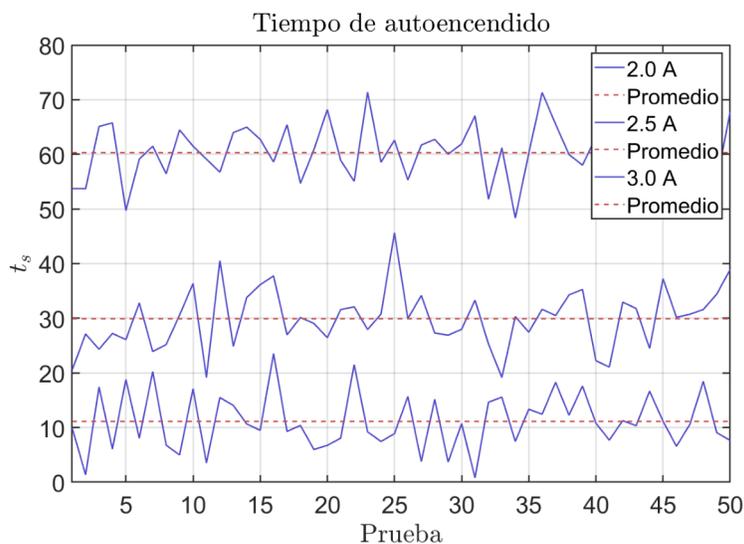


Figura 4.2: Variaciones en el tiempo de autoencendido.

El sistema fue capaz de encontrar una región de amarre siempre que la corriente de bombeo permitiera dicho régimen, y, como era de esperarse, al aumentar la corriente de bombeo disminuye el tiempo de autoencendido, pues las regiones pulsadas son más amplias y estables.

Podemos observar la evolución del sistema en el tiempo. Observando cómo la amplitud de los pulsos aumenta conforme pasa el tiempo, hasta que sobrepasa un umbral deseado y se deja ajustar el láser. Logrando un tiempo de asentamiento promedio de **11.5 s**.

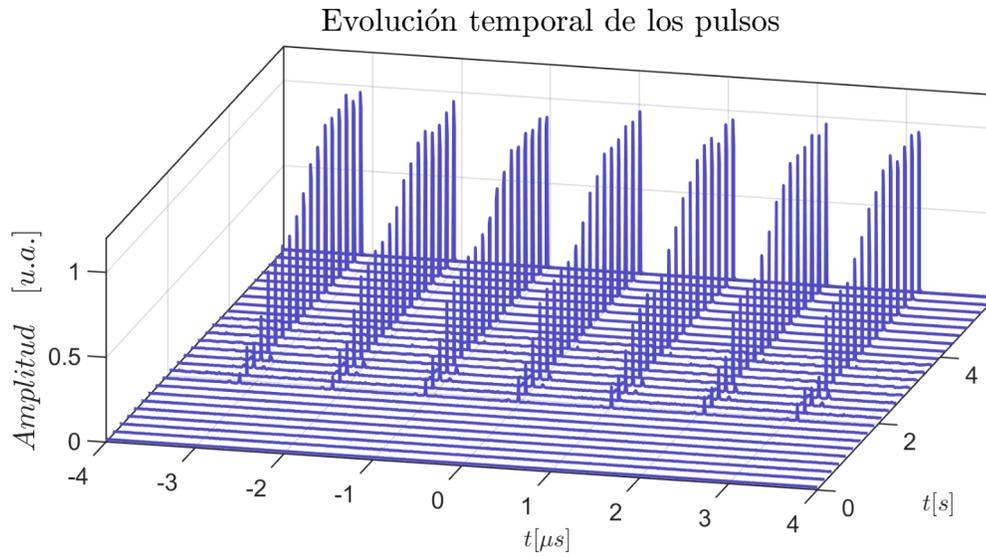


Figura 4.3: Evolución temporal de los pulsos.

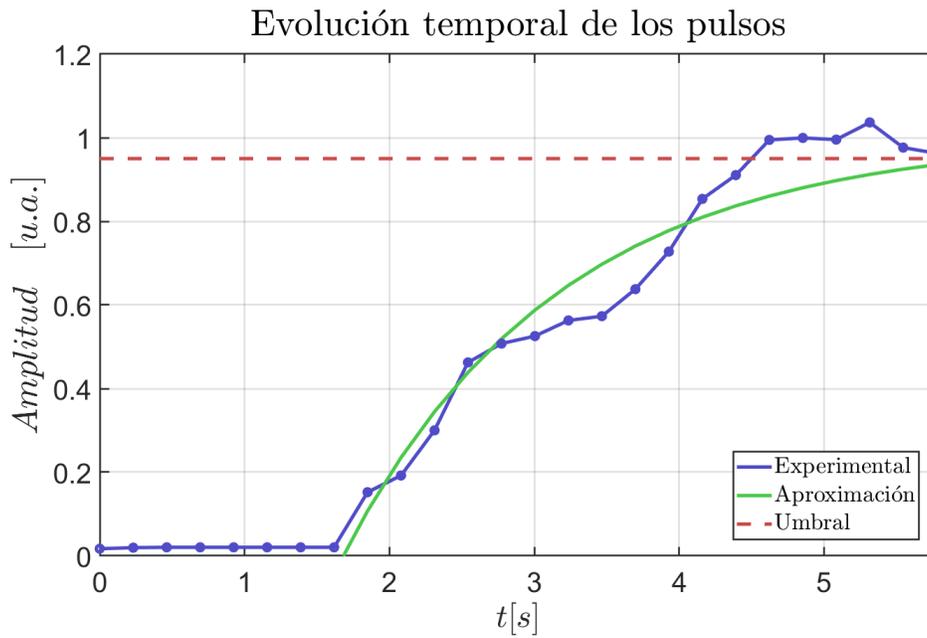


Figura 4.4: Amplitud de los pulsos en el tiempo.

4.3. Caracterización de dispositivos

El sistema de control cuenta con un segundo programa para el osciloscopio, en el cual guarda la medición del perfil temporal y la amplitud del pulso para discriminar si la región es estable, inestable o quasi-estable, realizando barridos de grados cada **5 s** y guardando el estado, generando una base de datos con los regímenes de operación del dispositivo.

Debido a la distribución aleatoria en tiempo de los pulsos de ruido, podemos observar distintos perfiles temporales.

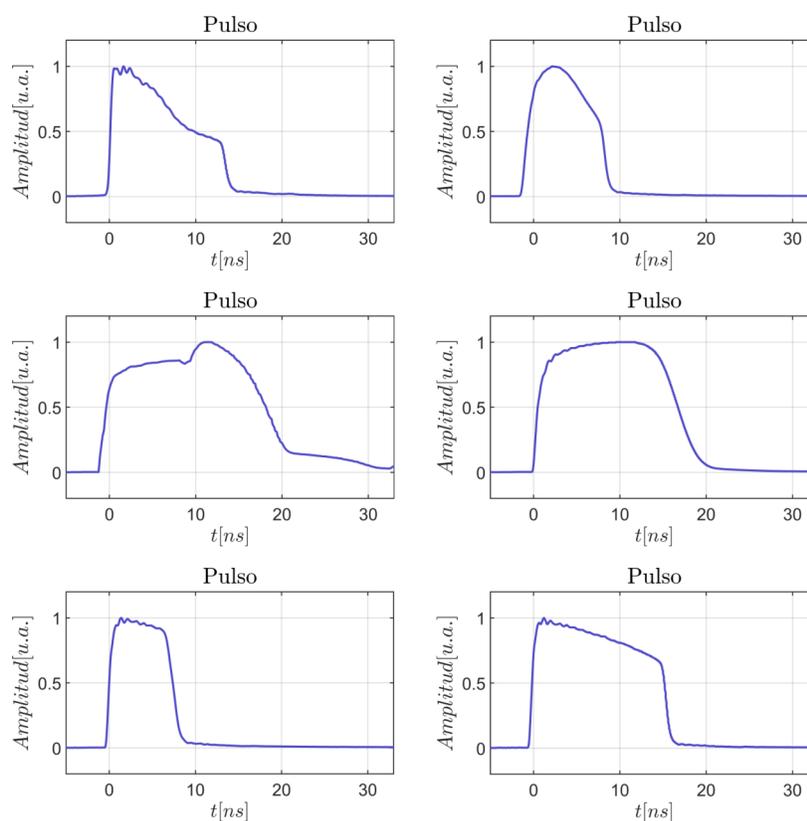


Figura 4.5: Varios perfiles temporales obtenidos.

Además de la generación de armónicos temporales.

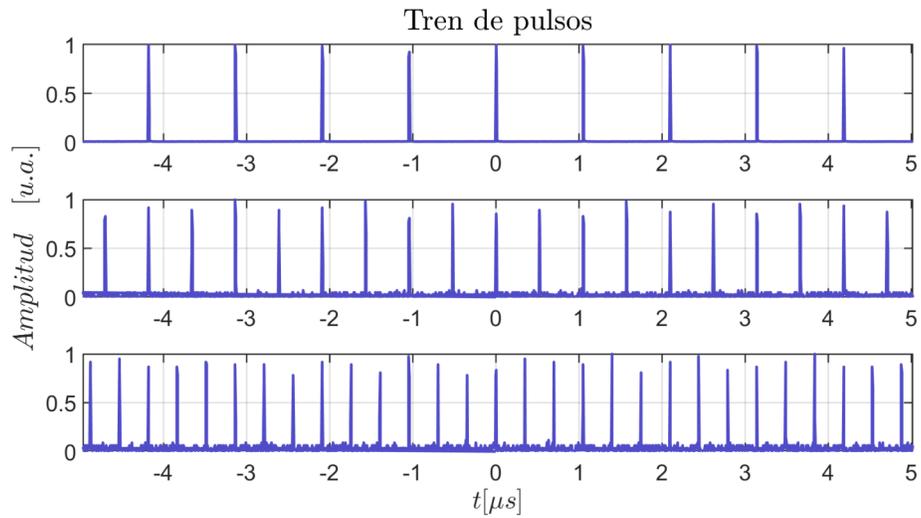


Figura 4.6: Varios trenes de pulsos obtenidos.

Y cada estado del láser genera un tipo de emisión espectral diferente.

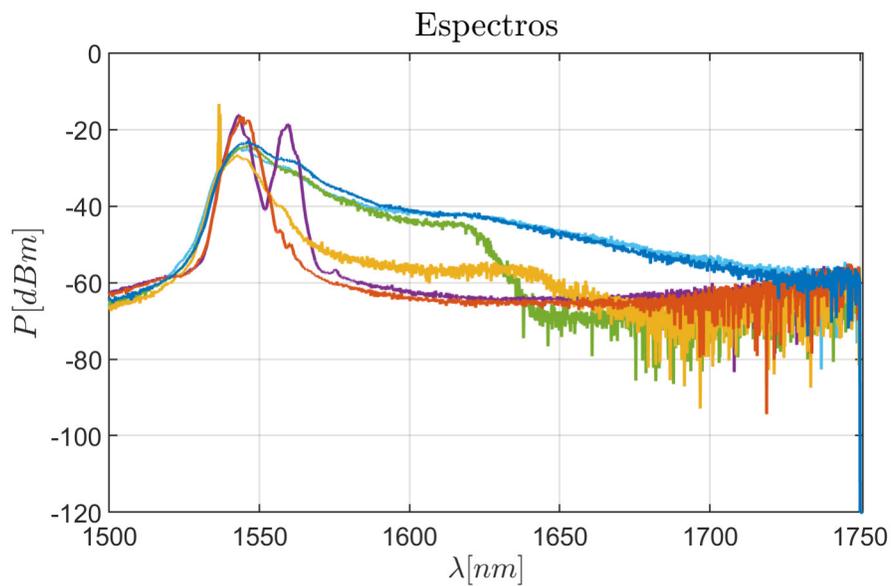


Figura 4.7: Distintos amplios espectros obtenidos.

Cada uno de los regímenes de operación del láser es una potencial área de estudio, y nuestro sistema de control permite una facilidad en su estudio, pues determina uno de los parámetros de búsqueda, el estado de polarización.

4.4. Referencias del capítulo

- [1] Thorlabs., Motorized Fiber Polarization Controllers, consultado en Motorized Fiber Polarization Controllers (thorlabs.com) el 21/10/23

- [2] Thorlabs, MPC320 - Motorized Fiber Polarization Controller for $\text{\O}900\ \mu\text{m}$ Jacket Fiber, 3 Paddles, $\text{\O}18\ \text{mm}$, consultado en Thorlabs - MPC320 Motorized Fiber Polarization Controller for $\text{\O}900\ \mu\text{m}$ Jacket Fiber, 3 Paddles, $\text{\O}18\ \text{mm}$ (thorlabs.com) el 21/20/23

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

El objetivo general de la tesis fue implementar un sistema de control automático basado en placas controladoras de polarización para láseres de fibra óptica. Se diseñó un sistema de autoencendido que permite el control sobre los pulsos en un láser de fibra óptica.

El sistema láser controlado presentó regiones de amarre en al menos dos zonas a lo largo de los 360° de la placa principal. Y logró estabilizarse en aproximadamente 11.5 segundos en las regiones pulsadas siempre que existieran, lo cual comenzaba a ocurrir a partir de 2.5 A de corriente de bombeo. Los espectros logrados tienen un ancho de banda amplio, muy útil en aplicaciones de sensado.

El módulo de control permite manipular en lazo abierto para el estudio de sistemas, en lazo cerrado para el autoencendido de láseres pulsados y en caracterización para analizar el comportamiento de dispositivos, facilitando el estudio de dispositivos complejos dependientes de la polarización.

En conclusión, caracterizamos, estudiamos y analizamos la evolución de las señales de salida en un láser de fibra (capaz de operar tanto en el régimen CW, como en el régimen pulsado). Permitiendo estudiar dinámicas como la variación en el perfil temporal de los pulsos y la frecuencia de repetición con la generación de armónicos.

Realizamos el diseño de un sistema para el análisis y automatización mediante el ajuste manual de la potencia de bombeo, y la automatización de la polarización mediante el ajuste del ángulo de placas retardadoras para su correcta operación.

Este estudio permite determinar al menos uno de los parámetros de entrada ideales para el correcto funcionamiento del láser.

5.2. Trabajos a futuro

El sistema es el primer paso en la implementación de un láser controlable de fibra óptica de dinámicas complejas. Los siguientes trabajos pueden estar enfocados en mejorar el sistema de retroalimentación para que realice mediciones del OSA, y/o control por retroalimentación en otras placas pola-

rizadoras para controlar el perfil temporal y espectral, realizando un control más riguroso para el control de los pulsos de ruido, con aplicaciones en sentido.

Es posible diseñar un sistema de retroalimentación basado en tres placas controladas por un mismo controlador, lo cual permitiría autoencender el láser y posteriormente ajustar el régimen a un perfil temporal de interés muy específico, gracias a un mayor control en cada etapa de polarización. Logrando mantener dicho estado temporal y/o espectral a lo largo del tiempo.

Otra área de oportunidad es el diseño de las placas motorizadas. Pues aún es posible realizar un diseño más compacto y robusto. Basándonos en controladores de polarización de placas más pequeñas o controladores en línea.

Finalmente, otros desafíos próximos son el estudio de aplicaciones de otros regímenes del láser, no sólo del régimen pulsado, sino también el estudio de dinámicas complejas en régimen inestable o continuo.

5.3. Artículos y participaciones en congresos

- S. G. Hernandez-Garcia, M. R. Tapia-García, F. A. Gomez-Rodriguez, D. A. Razo-Medina, J. C. Hernandez-Garcia, “Estudio, análisis y caracterización de lasers pulsados de fibra óptica para efecizar modes de operación” , XXVII Verano de la Ciencia Vol. 16 (ISSN: 2395-9797)

- M. R. Tapia-García, S. G. Hernandez-Garcia, J. C. Hernandez-Garcia, et al, “Estudio temporal y espectral de F8L mediante el uso de un sistema de ajuste automatizado de placas controladoras de polarización”, LXV CNF 2022, Zacatecas, Zacatecas.
- M. R. Tapia-García, S. G. Hernandez-Garcia, J. C. Hernandez-Garcia, D. A. Razo-Medina, O. Pottiez, J. D. Filoteo-Razo, R. Rojas-Laguna, J. M. Estudillo-Ayala, “Improvements in the study of F8L through automated adjust system based on polarization control plates”, SPIE Photonics West 2023
- M. R. Tapia-García, J. C. Hernandez-Garcia, S. G. Hernandez-Garcia, et al, “Uso de inteligencia artificial en láseres pulsados de fibra óptica”, LXVI CNF 2023, Morelia, Michoacán
- N. Manríquez-Cobián, S. D. Guevara-Hernández, J. C. Hernández García, S. G. Hernández-García, M. R. Tapia-García, “Estudio y desarrollo de láseres pulsados altamente energéticos operando a 1,064 nm capaces de generar el fenómeno de explosión de pulsos”, Convocatoria Institucional de Investigación Científica CIIC 003/2023.
- S. D. Guevara-Hernández, J. C. Hernández-García, J. D. Filoteo-Razo, J. M. Estudillo-Ayala, S. G. Hernández-García, M. R. Tapia-García, O. Potiez, D. Jauregui-Vázquez, D. A. Razo-Medina, R. Rojas-Laguna. “Desing and study of fiber optic interferometric devices applied to vibration detection systems”, SPIE Photonics West 2024.
- S.G. Hernandez-Garcia, M. R. Tapia-García, J. C. Hernandez-García,

- J. M. Estudillo-Ayala, O. Pottiez, J. D. Filoteo-Razo, J. P. Lauterio-Cruz, R. Rojas-Laguna. “Study and development of a compact fiber optic ring interferometer for implementation of vibration sensor using noise-like pulses”, Photonics North 2024.
- M. R. Tapia-García, J. C. Hernandez-García, S. G. Hernandez-García, J. D. Filoteo-Razo, J. M. Estudillo-Ayala, R. Rojas-Laguna, O. Pottiez, J. P. Lauterio-Cruz, “Sistema de control automático para el estudio experimental de láseres pulsados”, Congreso de Ciencia Tecnología e Innovación FASBIT-UABJO, Oaxaca, Oaxaca, 2024.
 - S. G. Hernandez-García, M. R. Tapia-García, J. C. Hernandez-García, J.D. Filoteo-Razo, J. M. Estudillo-Ayala, O. Pottiez, J.P. Lauterio-Cruz, Rojas-Laguna “Estudio de un interferómetro de fibra óptica en modo de anillo para el desarrollo de un sensor de vibración”, Congreso de Ciencia Tecnología e Innovación FASBIT-UABJO, Oaxaca, Oaxaca, 2024.
 - M. R. Tapia-García, J. C. Hernandez-García, S. G. Hernandez-García, et al., “Uso de redes neuronales predictivas en láseres de amarre de modos pasivo”, LXVII CNF 2024, Chihuahua, Chihuahua.
 - S. G. Hernandez-García, J. C. Hernandez-García, M. R. Tapia-García, J. M. Estudillo-Ayala, O. Pottiez, J.D. Filoteo-Razo, J. M. Sierra-Hernández y R. Rojas-Laguna, “Desarrollo de sensor de vibración mediante interferómetro todo fibra”, LXVII CNF 2024, Chihuahua, Chihuahua.
 - J. C. Hernandez-García, S. G. Hernandez-García, J. M. Estudillo-Ayala,

M. R. Tapia-Garcia, J. D. Filoteo-Razo, O. Pottiez, J. M. Sierra-Hernandez, R. Rojas-Laguna, “Use of Noise-Like pulses in Fiber optic interferometric devices to improve sensitivity of vibration sensor”, SPIE Photonics West, 2025.

5.4. Distinciones obtenidas

- M. R. Tapia-Garcia, Reconocimiento al desempeño académico 2024 por la Universidad de Guanajuato.

Apéndice A

Análisis de transmisión del NOLM

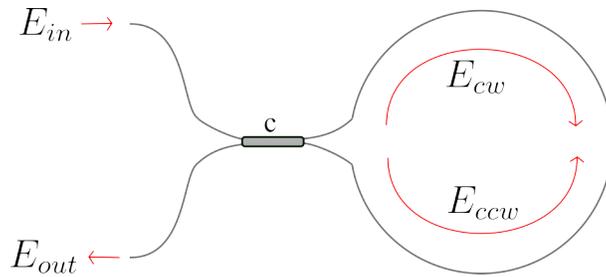


Figura A.1: Interferómetro Sagnac de fibra óptica.

$$E_{cw} = cE_{in}e^{i(kL+\gamma LcP_{in})}$$

$$E_{ccw} = -(1-c)E_{in}e^{i(kL+\gamma L(1-c)P_{in})}$$

$$E_{out} = E_{cw} + E_{ccw}$$

A.0.1. Análisis en régimen lineal (Bajas potencias)

$$P_{in} \approx 0$$

$$E_{out} = cE_{in}e^{ikL} - (1-c)E_{in}e^{ikL} = (c-1+c)E_{in}e^{ikL} = (2c-1)E_{in}e^{ikL}$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{|E_{out}|^2}{|E_{in}|^2} = \frac{|(2c-1)E_{in}e^{ikL}|^2}{|E_{in}|^2} = \frac{[(2c-1)E_{in}]^2}{E_{in}^2} = (2c-1)^2 \\ &= 4c^2 - 4c + 1 = 1 - 4c(1-c) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow T = 1 - 4c(1-c)$$

A.0.2. Análisis en régimen no lineal (Altas potencias)

$$P_{in} \neq 0$$

$$E_{cw} = cE_{in}e^{i(kL+\gamma LcP_{in})} = r_1e^{i\theta_1}$$

$$E_{ccw} = -(1-c)E_{in}e^{i(kL+\gamma L(1-c)P_{in})} = -r_2e^{i\theta_2}$$

$$\begin{aligned} E_{out} &= r_1e^{i\theta_1} - r_2e^{i\theta_2} = r_1(\cos\theta_1 + i\operatorname{sen}\theta_1) - r_2(\cos\theta_2 + i\operatorname{sen}\theta_2) \\ &= (r_1\cos\theta_1 - r_2\cos\theta_2) + i(r_1\operatorname{sen}\theta_1 - r_2\operatorname{sen}\theta_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{out} &= |E_{out}|^2 = (r_1\cos\theta_1 - r_2\cos\theta_2)^2 + (r_1\operatorname{sen}\theta_1 - r_2\operatorname{sen}\theta_2)^2 \\ &= r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2(\cos\theta_1\cos\theta_2 + \operatorname{sen}\theta_1\operatorname{sen}\theta_2) \\ &= c^2E_{in}^2 + (1-c)^2E_{in}^2 - 2cE_{in}(1-c)E_{in}(\cos\theta_1\cos\theta_2 + \operatorname{sen}\theta_1\operatorname{sen}\theta_2) \\ &= c^2E_{in}^2 + (1-2c+c^2)E_{in}^2 - 2E_{in}^2c(1-c)\cos(\theta_2 - \theta_1) \\ &= c^2E_{in}^2 + (1-2c+c^2)E_{in}^2 - 2E_{in}^2c(1-c)\cos(\gamma L(1-2c)P_{in}) \end{aligned}$$

$$I_{in} = E_{in}^2$$

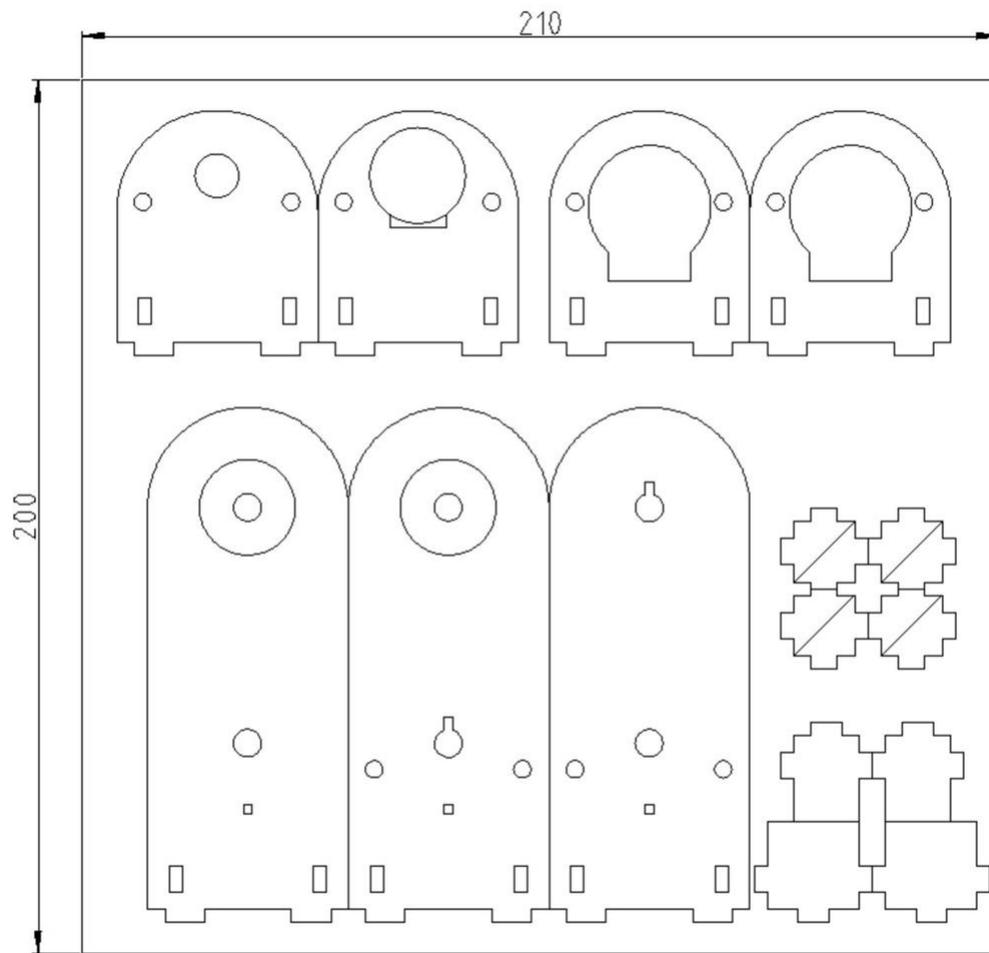
$$T = \frac{I_{out}}{I_{in}} = c^2 + (1 - 2c + c^2) - 2c(1 - c)\cos(\gamma L(1 - 2c)P_{in})$$

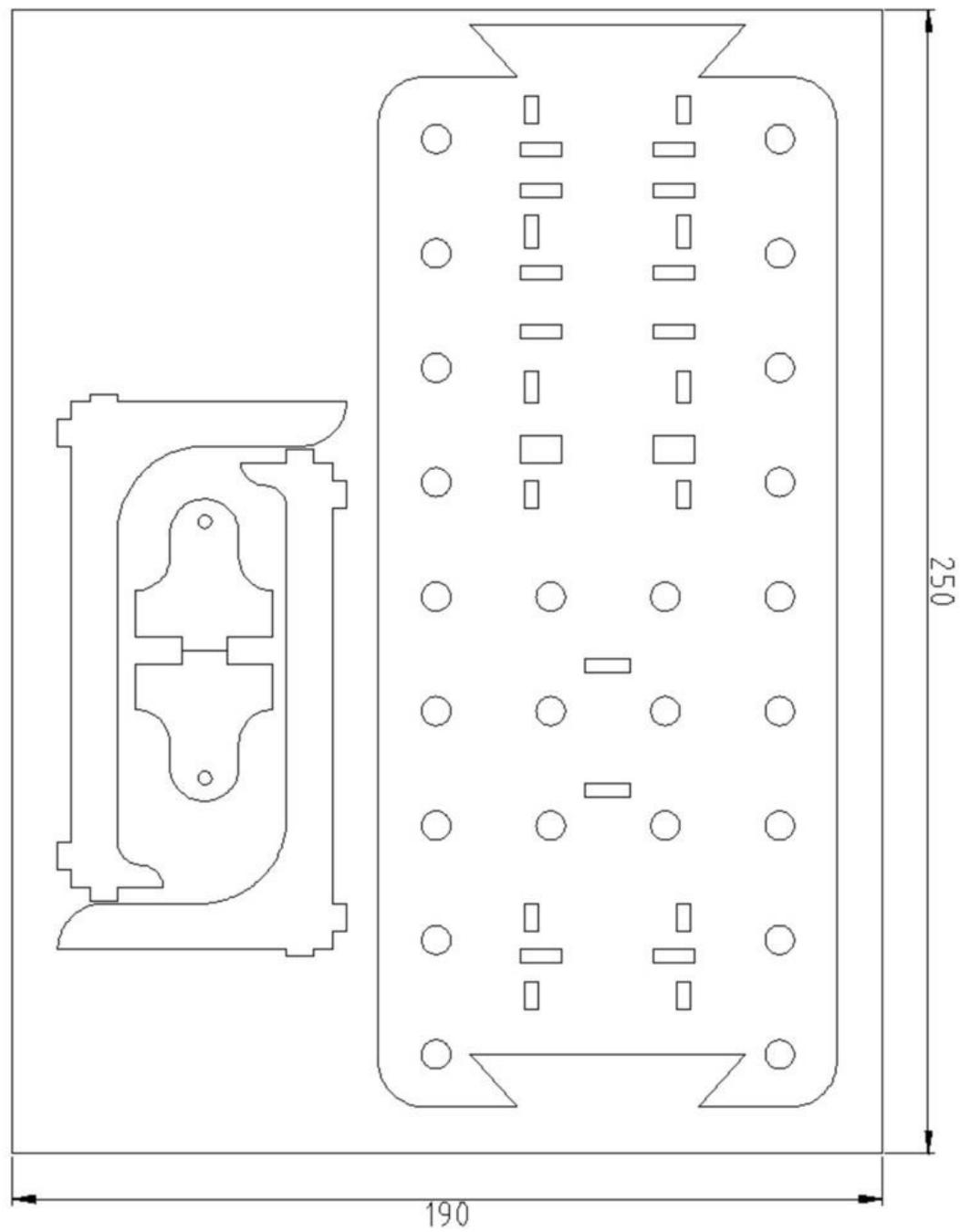
$$\Rightarrow T = 1 - 2c(1 - c)[1 + \cos(\gamma L(1 - 2c)P_{in})]$$

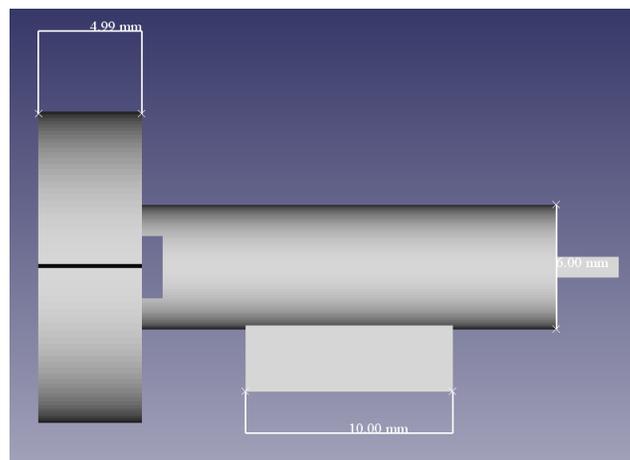
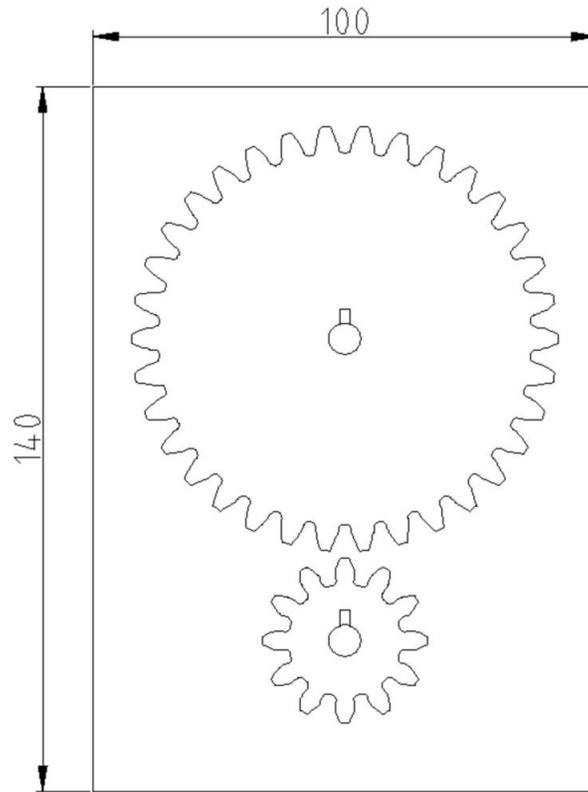
Apéndice B

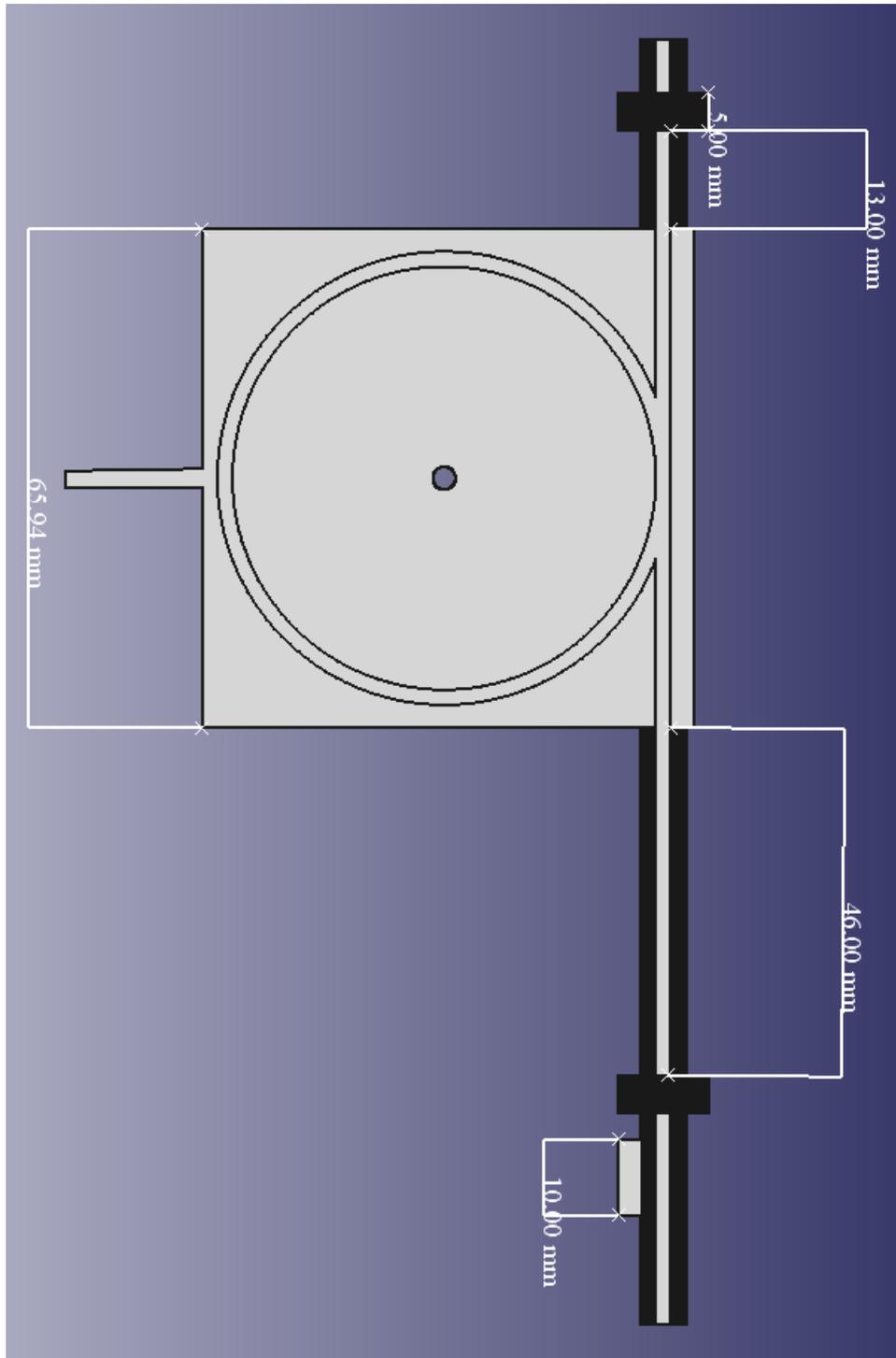
Placa de polarización motorizada

La placa controladora de polarización motorizada utiliza piezas cortadas a láser en un material de 3 mm de espesor. A continuación, se presentan las piezas con medidas en mm para su correcto escalado. Las piezas diseñadas en 3D también presentan medidas.









Apéndice C

Simulación del sistema láser

El sistema láser es simulable mediante la resolución numérica de las ecuaciones acopladas extendidas no lineales de Schrödinger.

$$\begin{aligned}\frac{\partial C^+}{\partial z} &= -i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 C^+}{\partial t^2} + \frac{2i\gamma}{3}(|C^+|^2 + 2|C^-|^2)C^+ + \frac{g}{2}C^+ \\ \frac{\partial C^-}{\partial z} &= -i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 C^-}{\partial t^2} + \frac{2i\gamma}{3}(|C^-|^2 + 2|C^+|^2)C^- + \frac{g}{2}C^-\end{aligned}$$

Utilizando un software como MatLab, podemos programar el perfil del pulso propagándose y los efectos que va sufriendo en cada etapa. Para garantizar una correcta convergencia del método, es necesario hacer que el pulso recorra el lazo varios cientos de veces, eventualmente el pulso tomará una forma definida en el tiempo pero aleatoria en amplitud, tendremos un pulso de ruido.

En la figura podemos apreciar un perfil temporal logrado y la envolvente de varios pulsos obtenidos, dicha envolvente es la que captan los instrumentos de medición como el osciloscopio.

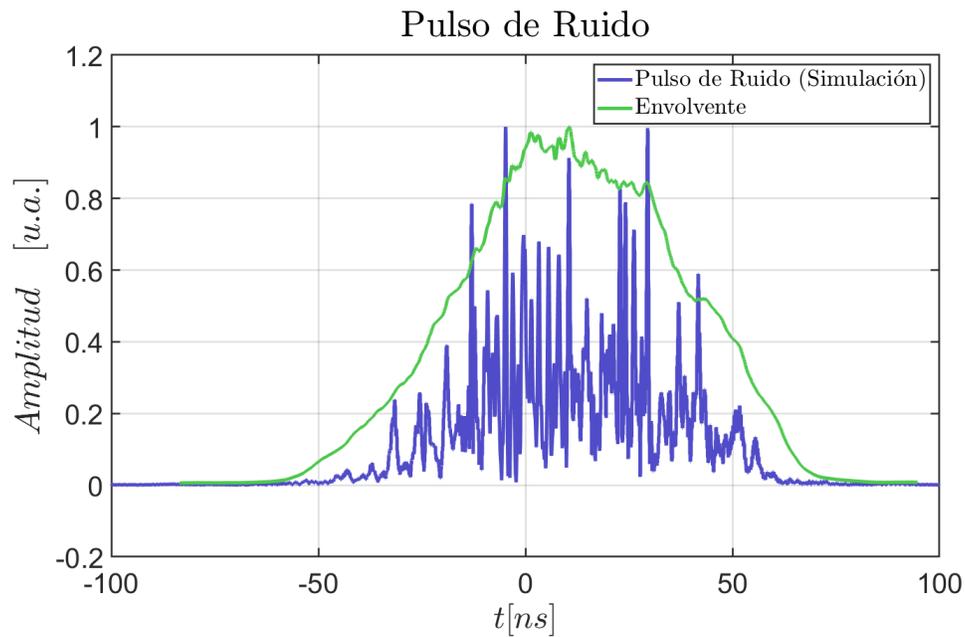


Figura C.1: Simulación de pulsos de ruido.

Manipulando el estado de polarización en el láser podemos tener cierto control sobre la distribución de los pulsos aleatorios, lo que nos ayuda a manipular el perfil temporal de la envolvente y nos permite obtener distintos pulsos y espectros a la salida del láser.