

Estudio, análisis y caracterización de láseres pulsados de fibra óptica para eficientizar modos de operación

Hernández García Stephanie Guadalupe¹, Tapia García Maximino Roberto¹, Gómez Rodríguez Fidel Alberto¹, Razo Medina Daniel Alberto¹, Hernández García Juan Carlos^{1,2}

¹ División de Ingenierías, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8 Km, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., 36885, México

sg.hernandezgarcia@ugto.mx; mr.tapiagarcia@ugto.mx; fa.gomezrodriguez@ugto.mx; darazo@ugto.mx

² Investigadoras e investigadores por México CONACYT, Av. Insurgentes Sur No. 1582, Crédito Constructor, Benito Juárez, 039040, México. jchernandez@ugto.mx

Resumen

En este artículo mostramos el diseño, la fabricación, y el funcionamiento de un control automatizado para placas retardadoras operando dentro del esquema de un láser pulsado de fibra óptica, buscando facilitar el estudio y caracterización del dispositivo óptico. Se estudiaron las características de operación de láseres pulsados de fibra para comprender las variables del sistema, utilizando de manera efectiva el diseño CAD para el modelado del equipo láser estudiado. Se diseñó e implementó un sistema de control para manipular el estado del equipo, ajustando la polarización con la ayuda de una tarjeta Arduino y el prototipo de las placas polarizadora. Posteriormente se caracterizaron, estudiaron y analizaron la evolución de las señales de salida del láser de fibra (capaz de operar tanto en el régimen CW, como en el régimen pulsado), buscando mejoras en su operación mediante los datos obtenidos. Finalmente, se proponen aplicaciones que se pueden implementar en base a los resultados obtenidos.

Palabras clave: Láseres pulsados de fibra óptica; polarización; control.

Introducción

Los láseres de fibra óptica son considerados: equipos novedosos, versátiles, eficientes y capaces utilizarse en aplicaciones de vanguardia. Resulta importante estudiar su funcionamiento para aplicarse en áreas médicas, industriales, científicas, entre otras. La polarización es un parámetro de importancia en el estudio de dispositivos láser operando bajo la técnica de amarre de modos, el ajuste de la polarización de la luz en este tipo de sistema óptico permite obtener una variedad de espectros de salida. Sin embargo, el contar con un ajuste de polarización particular muchas ocasiones es un proceso complicado que requiere de precisión y experiencia por parte del investigador para realizar una buena configuración, agregando además que se cuentan con variables que podrían realizar un cambio en el estado de polarización de la luz (p. e. birrefringencia inducida en la fibra). Una opción para lograr los resultados requeridos es el uso de sistemas de control, los cuales tienen grandes ventajas en dispositivos; son prácticos, de bajo costo y de rápida operación, creando respuestas casi inmediatas en los sistemas; agregando la automatización en estos dispositivos regulan su conducta o la de otro sistema para cumplir un fin determinado; estos sistemas se han ido desarrollando con el paso del tiempo teniendo la finalidad de reducir costos, tiempo y errores humanos que se puedan producir en los procesos, reemplazarlos por sistema programables que tengan una respuesta automática en función de una orden específica.

Existen varios componentes importantes en un sistema de control como son:

- Proceso: Es el conjunto de operaciones que se van a suceder con un fin determinado
- Actuador: Es el componente encargado de actuar sobre el proceso o maquina en función de la señal recibida del amplificador.
- Amplificador: Elemento que aumenta la amplitud o intensidad de una señal
- Comparador: Compara la señal de referencia para proporcionar la señal de error. Se le conoce también como detector de error.
- Generador del valor de referencia o consigna: Componente capaz de generar una señal análoga a la señal de salida que se quiere gobernar, encargada de imponer el valor deseado en la salida.

- Transductor: Dispositivo que transforma un tipo de energía en otro más apto para su utilización, si la energía transformada es de forma eléctrica se llama sensor (se la llama captador).
- Acondicionador de señales: Bloque que adapta la señal transformada por el transductor a los niveles adecuados del comparador. -
- Controlador: Elemento de los sistemas digitales que incluye las funciones del comparador, el amplificador y el acondicionador de señales. (ESM, Sistemas de automatización y control, 2022)

El propósito es el uso de herramientas que apoyen a la implementación de mejoras en la obtención de espectros, pudiendo impactar considerablemente en la formación de los estudiantes integrando su colaboración en aplicaciones relacionadas a estas áreas de trabajo. El presente proyecto tiene la finalidad de desarrollar un sistema de control que permita realizar de manera automática el ajuste de la polarización de la luz en un sistema de fibra óptica mediante el uso de placas retardadoras.

Láseres pulsados de fibra óptica

Los láseres son dispositivos que generan y amplifican señales electromagnéticas en frecuencias de radio, audio, microondas y luz. Dicho dispositivo produce luz intensa teniendo como característica principal ser coherente, la coherencia se logra cuando las amplitudes relativas de la onda del rayo de luz que se emite están en fase. Esto quiere decir que un láser genera luz que viaja en la misma dirección de manera muy ordenada en tiempo y espacio. A los láseres también se les considera como fuentes de luz cuasi monocromáticas; esto es, que emiten luz a una sola frecuencia o en un solo color (o casi de un solo color). Los láseres amplifican la luz generando un gran flujo de energía de salida. Por ello se dice que los láseres son altamente direccionales y muy brillantes.

Centrándonos en los láseres de fibra óptica y debido a que en la actualidad se han implementado como una poderosa herramienta para diferentes ámbitos científicos y tecnológicos, es por ello por lo que la elaboración de elementos que permiten optimizar este tipo de cavidades resonantes es de gran importancia. Particularmente los láseres de fibra óptica que producen pulsos ultracortos de luz tienen un gran impacto en la región espectral de 1550 nm, la cual ha sido explotada principalmente para aplicaciones en el área de comunicaciones ópticas, aunque como los láseres en general, tienen aplicaciones en muchas ramas, como la ingeniería, la medicina, y la industria.

Es importante notar que los láseres pueden ser de emisión continua o pulsada y que los nuevos diseños son los láseres de electrones, de semiconductores sólidos y de fibra óptica. Cada uno tiene aplicaciones muy particulares y con nuevos horizontes científicos que a veces resulta igual de atractivo conocer. Los primeros producen una señal constante en el tiempo y sin interrupciones, mientras que los pulsados generan un tren de pulsos igualmente espaciados. Estos últimos, tomando como referencia la técnica empleada para su obtención, pueden ser divididos en láseres de Q-switch (QS) y láseres de Mode-lock (ML) (Hernández, E., 2020). El ML es una técnica que permite producir pulsos ultracortos de luz, generalmente con duraciones del orden de picosegundos (ps) o femtosegundos (fs). El primer reporte de un láser operando con la técnica ML fue registrado en 1963, posteriormente su análisis matemático fue realizado por Haus en 1975 (Haus H. A., 1975), desde entonces, el estudio de estos láseres ha sido llevado a cabo tanto de manera teórica como experimental. Las configuraciones experimentales basadas en el método ML son compactas, tienen baja sensibilidad y una gran eficiencia, por lo cual, es uno de los métodos preferidos para la emisión láser. En los últimos años, la dinámica de los pulsos generados mediante esta técnica ha sido reportada observando diferentes comportamientos, tales como: pulsos de ruido (NLPs, Noise like pulses), solitones convencionales, disipativos, etc. Los cuales han demostrado ser ideales para aplicaciones relacionadas con sensores, micro-maquinado de materiales, generación de supercontinuo, entre otras.

Los láseres tipo Q-switch (QS), en cambio, son capaces de obtener pulsos de alta potencia pico con duraciones temporales relativamente largas de algunos nanosegundos(ns). El primer resonador Q-switch fue reportado en 1961 por Hellwarth y demostrado experimentalmente junto con McClung en 1962 en los laboratorios de investigación de Hughes (Hellwarth R.W., 1961). El principio de operación de esta técnica se basa en la modulación del factor de calidad de la cavidad (factor Q), que como ya se ha mencionado, puede llevarse a cabo de manera activa o pasiva, en ambos casos, la tasa de repetición de los pulsos QS se limita a decenas de kHz. Las principales ventajas de los láseres QS pasivos son sus diseños simples y su bajo costo debido a que no requieren el uso de moduladores externos y componentes electrónicos, sin embargo, los láseres QS activos permiten un control más preciso sobre las tasas de repetición y las características del

pulso, por tanto, este método es preferible para las aplicaciones prácticas como en la ingeniería médica, comunicaciones ópticas, sensado o espectroscopia (Ashraf F., 2014). Los láseres pulsados como su nombre lo indica poseen emisión pulsada; en este caso, la potencia de salida o potencia de pico no coincide con la potencia real de emisión (potencia media). Este tipo de emisión es característica del láser de As-Ga y se necesitan tres parámetros para definirla: potencia pico, duración del pulso y frecuencia de pulsos. De tal forma que, la potencia media puede calcularse de la siguiente manera:

$$\text{Energía de pulso.} \quad E_i = (Pp)(t_i), \quad (1)$$

$$\text{Potencia media.} \quad P_m = \frac{E_i}{(t_i+t_r)}, \quad (2)$$

Donde Pp es la potencia de pico, t_i es el tiempo de duración del pulso y t_r es el tiempo de reposo. Puesto que la frecuencia F es el número de veces que se repite un ciclo ($t_i + t_r$) por segundo, la potencia media será:

$$P_m = (Pp)(t_i)(F), \quad (3)$$

En general, el tiempo que dura un pulso de luz láser producido por un láser pulsado depende de la duración del pulso óptico o eléctrico que produce la fuente de excitación. Para muchas aplicaciones prácticas la duración de tales pulsos láser es bastante grande y la intensidad del pulso es demasiado pequeña. Por lo tanto, se han diseñado varias técnicas que permiten obtener pulsos láser de duración muy corta y de muy alta intensidad, características que son necesarias casi para toda aplicación de un láser pulsado; entre estas técnicas se destaca la de amarre de modos. El amarre de modos es una técnica para obtener pulsos ultracortos en láseres, los cuales serán denominados láseres de bloqueo de modo. Aquí, el resonador láser contiene algún tipo de dispositivo de bloqueo de modo (bloqueador de modo), ya sea un elemento activo (un modulador óptico) o un elemento pasivo no lineal (un absorbente saturable), que provoca la formación de un pulso ultracorto que circula en el resonador láser. El amarre de modos se puede dividir en dos clasificaciones: amarre de modos pasivo, y amarre de modos activo.

En este caso, nos enfocaremos en el amarre de modos pasivo. El amarre de modos pasivo (con un absorbente saturable, el cual permite alcanzar una estabilidad y energía de emisión sin aumentar la complejidad del sistema) permite la generación de pulsos mucho más cortos (femtosegundos), básicamente porque un absorbente saturable, impulsado por pulsos ya cortos, puede modular las pérdidas del resonador mucho más rápido que un modulador electrónico: cuanto más corto se vuelve el pulso, cuanto más rápida sea la modulación de la pérdida, siempre que el absorbente tenga un tiempo de recuperación suficientemente corto. La duración del pulso puede estar incluso muy por debajo del tiempo de recuperación del absorbente. En algunos casos, no se logra un bloqueo confiable del modo de arranque automático.

En la actualidad, se ha estudiado y demostrado que láseres de fibra en amarre de modos pasivo operan en varios regímenes para generar pulsos ultracortos coherentes, incluyendo el régimen de dispersión anómala donde generan pulsos de solitón convencional, régimen de "dispersion-managed solitón", régimen "self-similar pulse", régimen de dispersión completamente normal (all-normal dispersion, ANDi), y más recientemente el régimen de resonancia de solitón disipativo. Dichos regímenes de operación se suponen que generan pulsos ultracortos coherentes y estables, sin embargo, se ha reportado que el amarre de modos también genera pulsos con baja coherencia temporal definidos como pulsos de ruido (NLPs, por sus siglas en inglés), los cuales se han observado recientemente en ambos regímenes de dispersión: normal y anómala.

En el presente proyecto se estudiará y caracterizará el láser de la figura 1, la placa retardadora QWR es el elemento al cual se le implementará el control. Se puede observar el esquema empleado, el cual posee un arreglo de figura ocho formado por una sección de anillo y un NOLM. En la sección del anillo, se utilizó un combinador de 980/1550 nm para lanzar la potencia de la bomba desde un diodo láser de 976 nm (Focus Light DLS03-FCMSE55-I-25-976-5) hasta la fibra activa. Se tiene un aislador óptico para garantizar el funcionamiento unidireccional del láser. (Lauterio C., 2016) Como resultados se obtuvo que un polarizador en la entrada NOLM integrado por polarización no es necesaria en este esquema, ya que, el bloqueo del modo se debe a la acción de absorción saturable del NOLM y no a la rotación de polarización no lineal (NPR) en la sección del anillo. Teniendo como resultado final longitudes de ondas más cortas, alcanzando un ancho de banda de 450 nm.

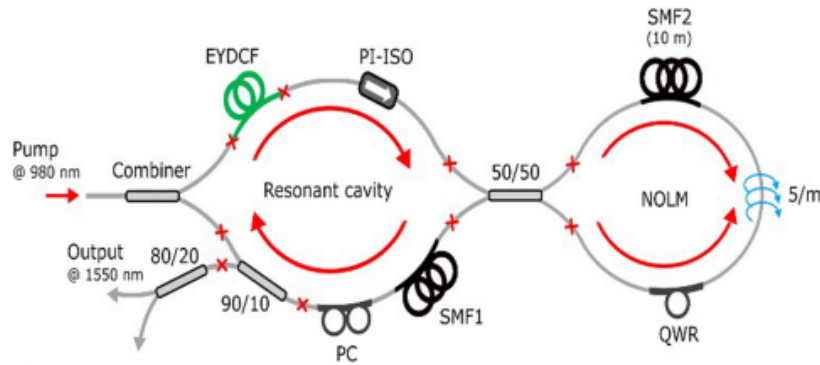


Figura 1. Arreglo experimental del láser pulsado de fibra óptica.

Los láseres PML se pueden dividir en dos arquitecturas: el diseño de la cavidad de anillo y la cavidad láser de figura ocho, donde e primero utiliza no linealidad de polarización (NPE) en la cavidad, produciendo una actividad dependiente de la potencia por medio de un polarizador, la ventaja de esta arquitectura es que es eficiente para lograr un espectro de banda ancha y pulsos ultracortos; mientras que la segunda arquitectura presenta la particularidad de la conmutación no lineal por medio de un NOLM, para que este dispositivo presente conmutación la simetría del esquema Sagnac debe romperse por lo cual se aplican QWR. En este trabajo se tiene un arreglo de figura ocho con fibra dopada de erbio-iterbio de doble revestimiento y un NOLM basado en la polarización no lineal, esto crea un láser de fibra bloqueado pasivamente (PML), los cuales son fuentes de bajo costo y compactas que tienen una amplia gama de aplicaciones entre ellas destaca los pulsos en regímenes estacionarios similares al ruido (NLP).

Diseño de la placa controladora de polarización.

Para realizar el prototipo de la placa se realizaron ajustes y modificaciones al diseño estándar utilizado en el laboratorio (FPC560 Thorlabs), la estructura propuesta de la placa retardadora automática se realizó mediante el software de diseño asistido por computadora SolidWorks y la impresora 3D, utilizando para el ensamblado tornillos de 1/8 in en las distintas piezas de la placa y tornillos de 1/4 in en la mesa de trabajo para sujetar el diseño. Para que cumpla con las características antes mencionadas del proyecto, se creó una serie de piezas adicionales en el cual se pudieran hacer los ajustes necesarios dependiendo de los grados de libertad de la placa, del motor y los sensores que se requieran. La Tabla 1 muestra la cantidad de piezas que son requeridas, así como el diseño de cada una de las piezas necesarias para su posterior ensamblaje. El software de SolidWorks permite el modo ensamblaje en el cual se puede observar una vista preliminar antes de proceder a la impresión de cada una de las piezas, figura 2.

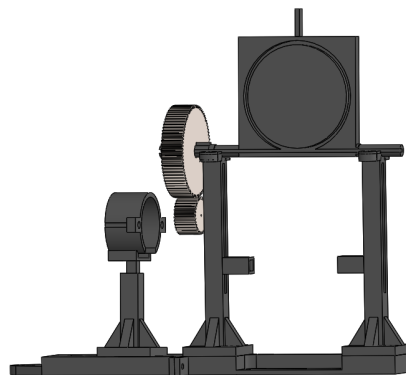

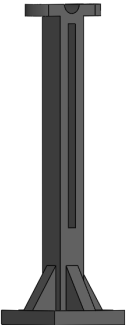
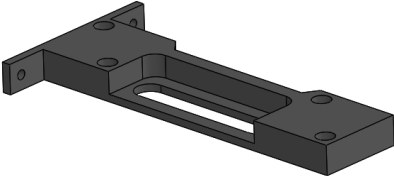
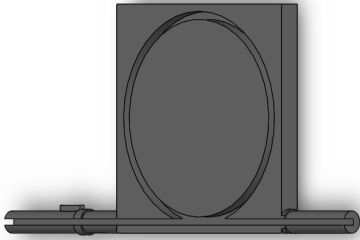
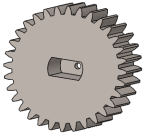
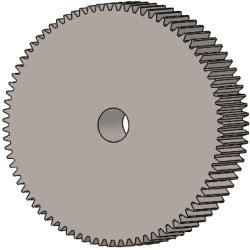
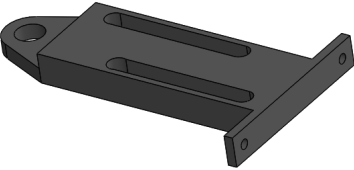
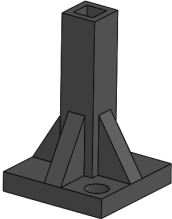
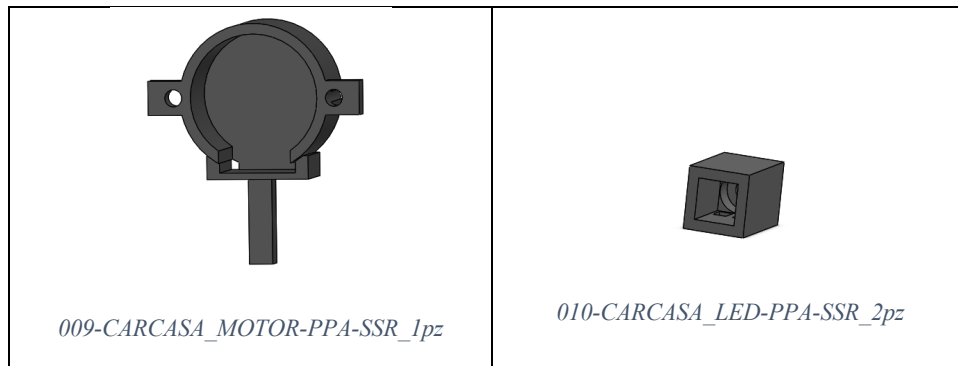


Figura 2. Primer prototipo diseñado.

Tabla 1. Piezas diseñadas

 <p>001-ABRAZADERAS_PLACA-PPA-SSR_2pzs</p>	 <p>002-POSTES_PLACA-PPA-SSR_2pz</p>
 <p>003-BASE_PLACA-PPA-SSR_1pz</p>	 <p>004-PLACA_POLARIZADORA-PPA-SSR_1pz</p>
 <p>005-PIÑON9-PPA-SSR_1pz</p>	 <p>006-ENGRANE-PPA-SSR_1pz</p>
 <p>007-BASE_MOTOR-PPA_1pz</p>	 <p>008-POSTE-CON-BASE3_MOTOR-PPA_1pz</p>



En la figura 3 se puede observar cada una de las piezas impresas, así como el ensamble para el correcto funcionamiento de la placa retardadora automática.

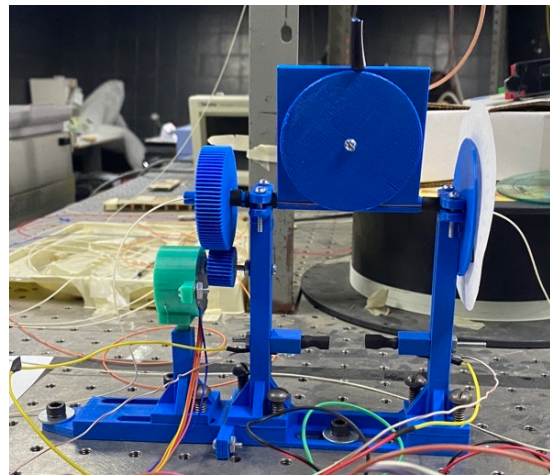


Figura 3. Primer prototipo desarrollado.

Diseño del sistema de control

Al encenderse el Arduino, o reiniciarse, lo primero que hace es buscar el punto de referencia (el origen), ya que al estar desconectado se pudo haber descalibrado. El origen se detecta con un fotodetector, el cual, cuando la placa pasa por la posición de interés se envía un pulso que lo para (especificando el origen del sistema). Posteriormente el sistema de control entra en modo de búsqueda, haciendo un barrido de 0° a 360° y de regreso, una y otra vez, permaneciendo en ese estado hasta que se le interrumpe (se encuentra la región de interés). La interrupción se dispara cuando se detecta un pulso, y mientras siga detectando el pulso se quedará en esa posición, si se llega a perder la señal termina la interrupción y continúa el sistema de control en el modo de búsqueda, hasta que nuevamente encuentre el pulso.

El sistema de control está basado en la programación de Arduino, y se realizó con ayuda de las interrupciones del microcontrolador, e implementando los diagramas de flujo de la figura 4.

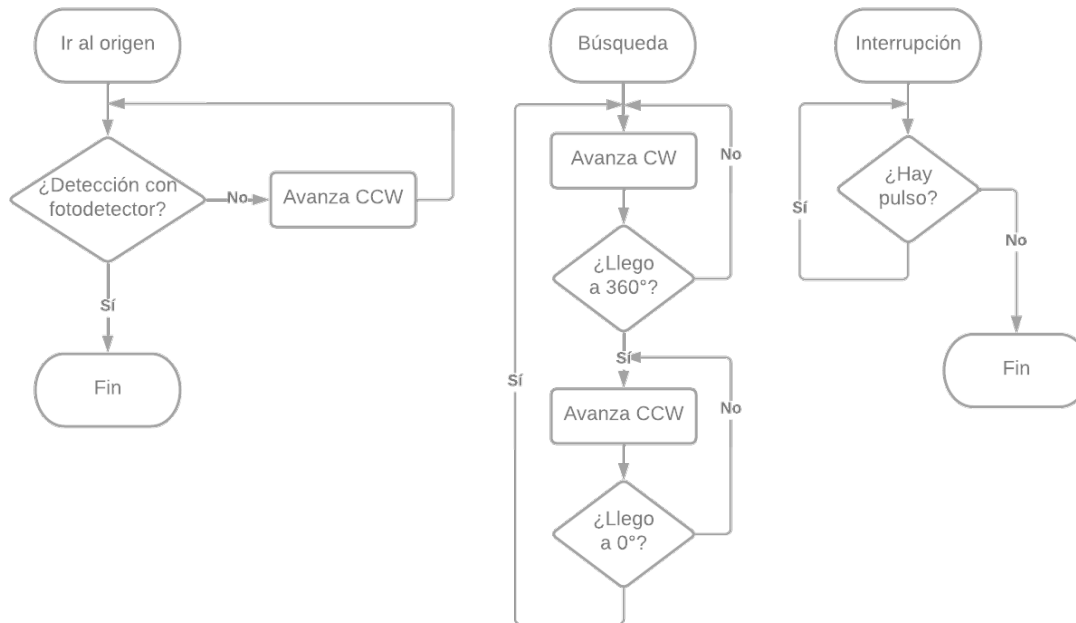


Figura 4. Diagramas de flujo del programa inicial de buscar punto de referencia, programa principal de búsqueda, y la interrupción llamada al detectar pulso.

Materiales y métodos

Para llevar a cabo de manera efectiva el sistema de control se utilizaron los materiales y herramientas de la tabla 2.

Tabla 2. Materiales

Materiales y herramientas					
Láser de fibra óptica	Empalmadora de fibra	Fibra óptica SMF28	Analizador de Espectros Ópticos Modelo Advantest Q8347	Fuente de corriente ITC4020 de Thorlabs.	Osciloscopio MSOX6004A de Keysight
Arduino UNO	Software de Arduino	Motor a pasos 28byj-48	Controlador de motor a pasos	Fototransistor	Fotodiodo infrarrojo
Placa de prueba de circuitos	Resistencias	PLA	Software de diseño 3D	Impresora Makerbot Replicator +	PVC

Con ayuda de la tarjeta Arduino, los componentes electrónicos (fotodiodo y foto transistor), los componentes eléctricos (las resistencias) y el programa, se implementó un sistema de control para manipular el motor a pasos de acuerdo con el diagrama de flujo presentado anteriormente.

En la figura 5 se muestra el circuito del fotodetector para localizar cuando la placa pasa por la referencia de 0°.

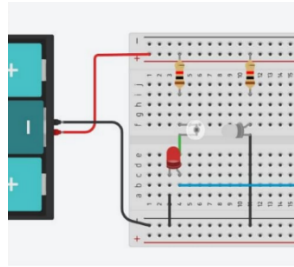


Figura 5. Circuito fotodetector.

Para manipular el motor se conectó al controlador y este a su vez al Arduino, como en la figura 6, es posible alimentar los motores con el Arduino, sin embargo, para una mayor eficiencia es mejor alimentarlos con una fuente externa de +12 v.

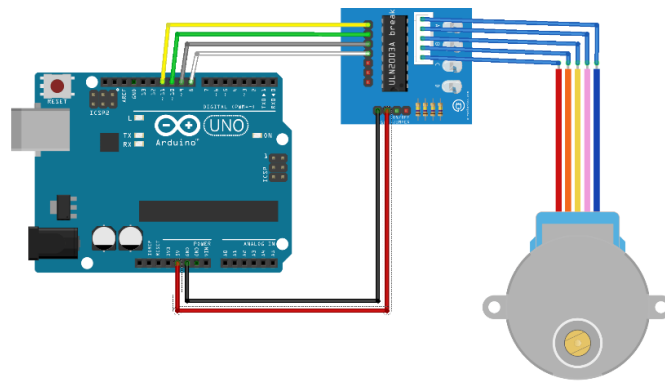


Figura 6. Control del motor.

En el software de diseño 3D se diseñaron las piezas necesarias y se imprimieron en PLA en la Makerbot. Finalmente, con unas placas de PVC se realizó una protección para el circuito. Para obtener la señal de retroalimentación y conocer si existen o no pulsos en el láser se proponen dos métodos

- Utilizando el software del osciloscopio. Keysight BenchVue.
- Utilizando el software LabView para controlar el osciloscopio.

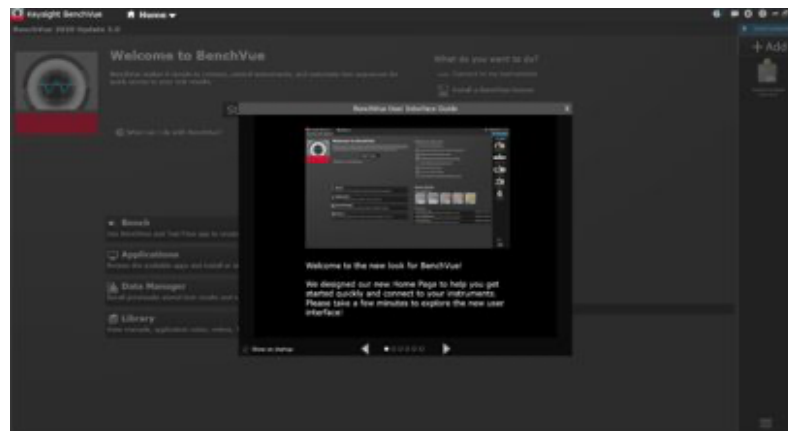


Figura 7. Software Keysight BenchVue.

Las ventajas del primero son que permite la adquisición de datos, el control de osciloscopio de forma completa, así como ajustar de forma virtual todos los parámetros de medición, entre otras. Sin embargo, el software solamente es una versión demo de 30 días, si se necesita utilizar se debe pagar la licencia.

Por otra parte, el segundo método no requiere pago de licencia para controlar el osciloscopio, se puede modificar el software a las necesidades del usuario, se genera de forma rápida una interfaz de usuario que puede modificarse, lo cual permitirá aplicaciones de control virtual de instrumentos de medición. La desventaja es que conlleva tiempo de desarrollo.

Resultados y discusión

El diseño de la placa polarizadora y el sistema de control desarrollado se puede ver implementado en la figura 8, en la cual se muestra cada uno de los materiales que son necesarios para el estudio, análisis y caracterización del láser. Como se muestra en la figura contamos con una serie de engranes que están acoplados a un motor a pasos con el cual es posible girar con mayor precisión la placa polarizadora con una libertad de 360°, logrando así, una cantidad mayor de regiones posibles para encontrar la caracterización del láser.

La placa polarizadora está diseñada mediante unos canales internos para que la fibra óptica sea insertada en ella. La placa a su vez mientras está girando permita determinar el ángulo en el que se está moviendo y así mediante el osciloscopio permita mostrar los resultados de interés para este análisis y estudio.

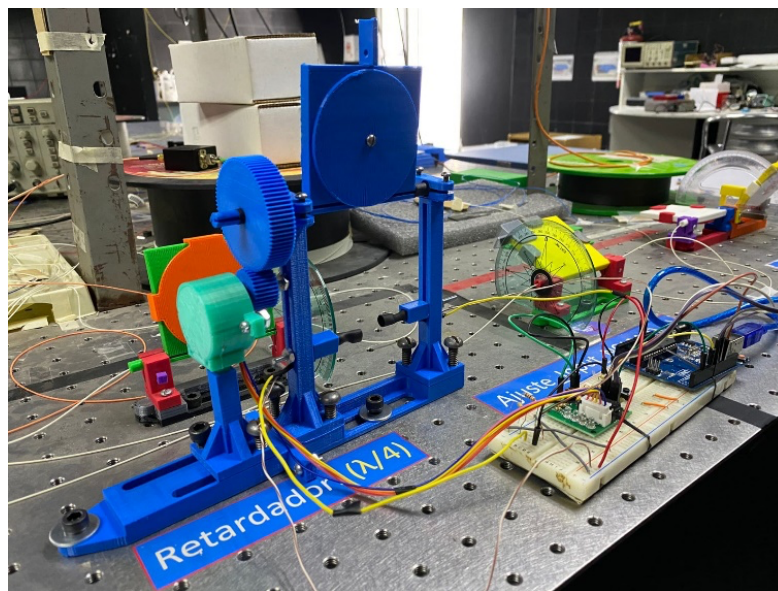


Figura 8. Control de polarización automático conectado al láser.

Al conectar el sistema de control a la placa y encender el láser. Los resultados se observan mediante el osciloscopio, ya que es el dispositivo del laboratorio que permite mostrar la señal pulsada, cuando la placa retardadora automática encuentra la posición óptima. Se produjeron distintos tipos de pulsos.

En la figura 9 se muestra los pulsos que arroja el control de la placa polarizadora haciendo una captura de pantalla del osciloscopio.

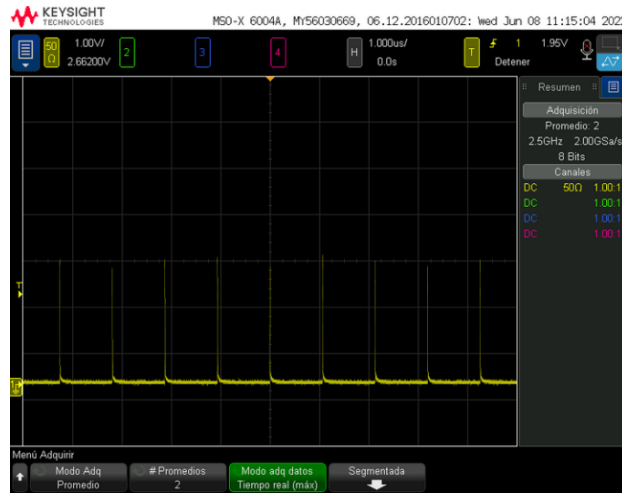


Figura 9. Pulsos obtenidos a la salida del láser medidos con el osciloscopio.

En esta sección se muestra a detalle la señal obtenida del osciloscopio, haciendo un zoom mediante un escalamiento menor en el eje vertical, mostrando la forma de los pulsos obtenidos mediante el funcionamiento de la placa retardadora automática.

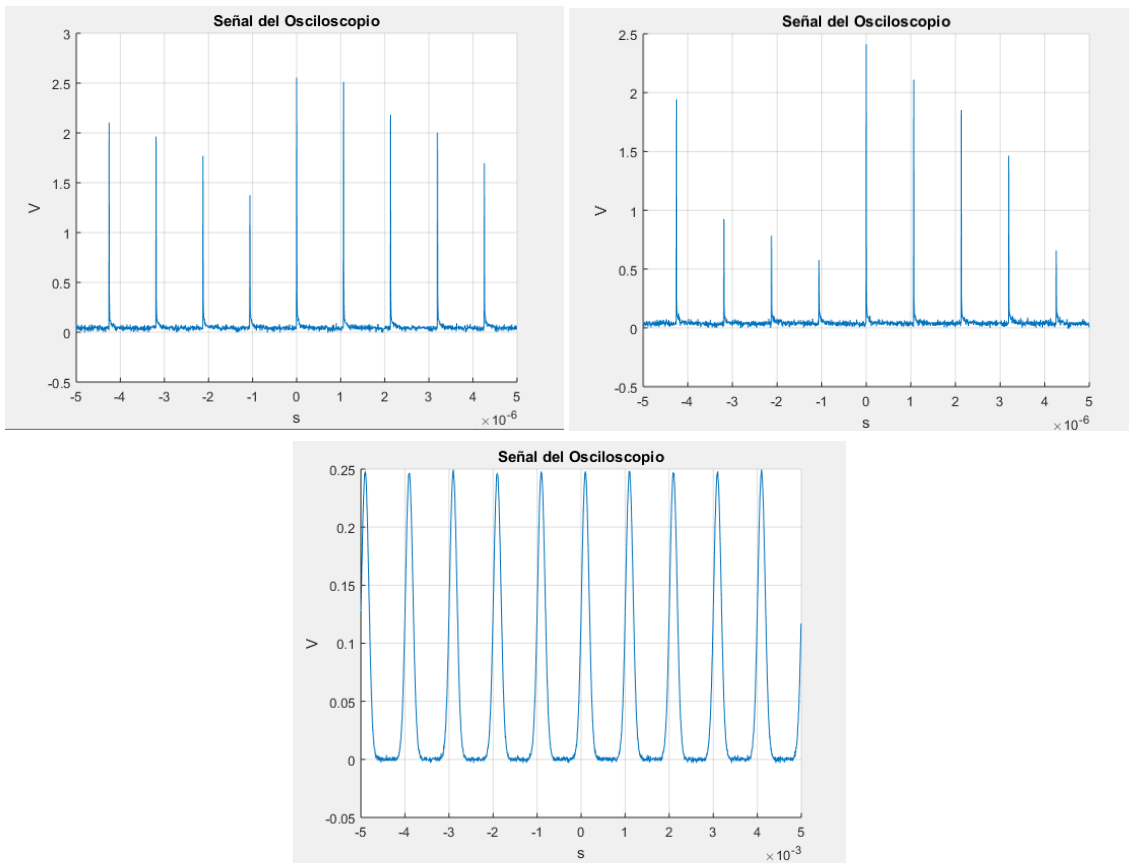


Figura 10. Pulsos obtenidos a la salida del láser medidos con el osciloscopio.

Se pudo observar la evolución de los pulsos en el osciloscopio cuando la placa se auto posicionaba dentro del esquema, mostrando como se variaba el ancho temporal e intensidad de los pulsos (figura 11).

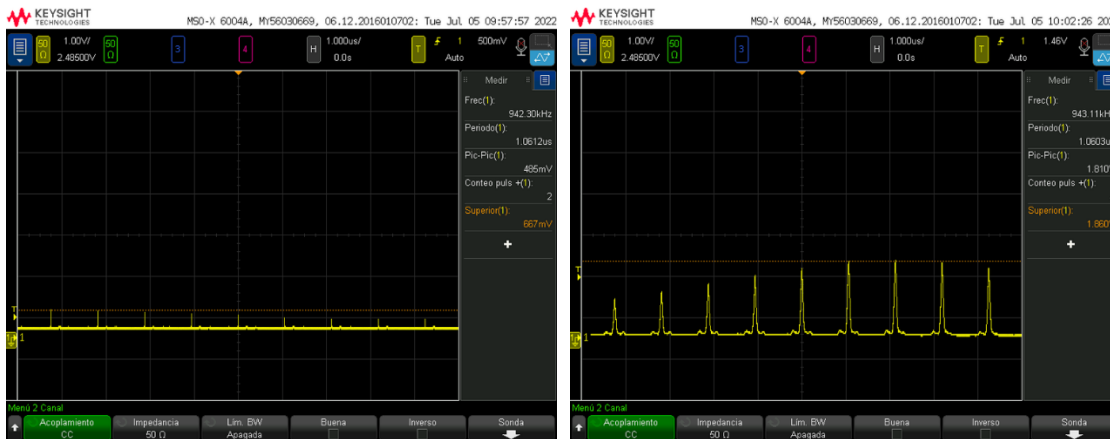


Figura 11. Variación del tren de pulsos en 55° y 220° medidos con el osciloscopio.

Los resultados obtenidos del análisis y estudio del funcionamiento de la placa retardadora automática muestran que aún hay trabajo a realizar, permitiendo observar pulsos óptimos (con duraciones del orden de fs, y mejores amplitudes que los obtenidos previamente). Para trabajo a futuro se buscará implementar un sistema de 3 ángulos formado con múltiples placas retardadoras que en conjunto formarán un control de polarización más eficiente, de igual forma para continuar mejorando los resultados y el sistema de control se buscará implementar la inteligencia artificial para una caracterización más eficiente.

Conclusiones

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). Realizamos un análisis y automatización mediante el control de la potencia de bombeo, la polarización y el ajuste del ángulo de placas retardadoras para su correcta operación. Este estudio permite determinar los parámetros de entrada ideales para el correcto funcionamiento del láser, posteriormente con los resultados obtenidos en este trabajo se buscará continuar la automatización de los demás parámetros dentro del láser. Se propuso un diseño más eficiente de un láser pulsado de fibra óptica; esto se muestra con las principales ventajas obtenidas en el verano de investigación UG, las cuales consisten en el autoencendido del láser pulsado y en caso de que ocurra un desajuste en el régimen pulsado, el láser cuenta con la capacidad de autoajustarse. Las posibles aplicaciones generadas se centrarán en el diseño de elementos ópticos que se basen en el ajuste de la polarización de forma automatizada; p. e. un módulo de autoajuste de polarización de la luz, o bien un sistema que permita el control en un láser multilongitud de onda.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el CONACYT mediante el programa Investigadoras e Investigadores por México proyecto 3155 y por la Universidad de Guanajuato a través de la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2022 proyecto 019/2022. Agradecemos a la Universidad de Guanajuato por llevar a cabo los Veranos de la Ciencia y permitirnos participar en ellos.

Referencias

- ESM. Sistemas de automatización y control, consultado el 39/6/22 en <https://esmlogistics.com.mx/sistemas-de-automatizacion-y-control>
- Hernández, E. (2020) "Fuentes de luz de fibra óptica: Láseres pulsados y Generación de supercontinuo." UASLP. Recuperado el 29 de junio de 2022 de <http://ninive.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/5794/TesisD.FC.2020fuenteshernandez.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Haus H. A. (1975) "A theory of forced mode locking," IEEE J. Quantum. Electron. pp 323-330, consultado el 29/06/22
- Hellwarth R.W. (1961) "Control of fluorescent pulsations, in Advances in Quantum Electronics," (Columbia University Press, New York), consultado el 29/06/22
- Ashraf F., El-Sherif, Talaat M., (2014) "Detection and analysis on versatile coding strategies of high frequency active Q-Switched Nd:YVO4 laser for irradiance on different targets", Opt. Laser Technol. pp 124- 132, consultado el 29/06/22
- Maya F., (S/F). Láseres de fibra óptica de alta potencia, pág. 25 el 29/06/22
- Morales J., (S/F). Láseres sintonizables de fibra óptica, consultado el 29/06/2022
- Lauterio C. (2016). High energy noise-like pulsing in a double-clad Er/Yb Figure-Eight Fiber Laser