

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS
“AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE
FABRICACIÓN DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA
TIPO LPG Y SUS APLICACIONES”

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN FÍSICA

ELABORADA POR:

MARIO JARET TRIGOSO SALDAÑA

ASESOR:

Dr. LUIS MOSQUERA LEIVA

LIMA – PERÚ

2021

*A mi familia y amigos,
quienes forman parte de mí día a día*

AGRADECIMIENTOS

El primer agradecimiento que deseo expresar es a Concytec, y todas las personas involucradas en brindarnos la oportunidad de formar parte de la ciencia y seguir con nuestra pasión a través del programa de becas de maestría. Gracias a ellos, no solo he podido desarrollar una investigación y tener una formación en estos dos años, sino que estoy seguro que será una relación para toda la vida con esta casa de estudios, lo cual me llena de mucho entusiasmo para continuar con posteriores investigaciones en ella.

A mi asesor de tesis, el Dr. Luis Mosquera Leiva, quien ha sido un excelente profesor y tutor a lo largo de esta etapa, apoyándome con su amplia experiencia en los puntos difíciles de la investigación, permitiendo su culminación. Asimismo, agradecer al Dr. Héctor Loro, coordinador de la maestría, que constantemente nos motivó y dio seguimiento a los alumnos, apoyándonos en la realización de las diversas tesis.

También agradezco a mi familia, quienes me apoyaron en cada etapa de mi vida como trabajador y estudiante. Y finalmente, a mis amigos, en especial los del programa de la maestría, con quienes hemos compartido ideas para el desarrollo de nuestras investigaciones.

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla un sistema que permite fabricar fibras de red de período largo (LPG, por sus siglas en inglés), que son conocidas por ser sensores eficientes en monitoreo de estructuras debido a su bajo costo y su tolerancia al ruido electromagnético y la corrosión. Un láser de CO₂ enfocado es uniformemente aplicado a una fibra óptica, con un período de 500um entre cada punto de quemado, para lo cual se utiliza un sistema de soportes y posicionamiento de precisión, todo controlado mediante una interface en el computador. Subsecuentemente, es realizada la verificación de que redes uniformes fueron impresas en las fibras, utilizándose un microscopio para la inspección visual. Se emplea la fibra LPG fabricada como sensor de deformación en una configuración de voladizo para verificar su operatividad. De este modo, se asegura que las fibras tengan la calidad suficiente para ser usadas como sensores de deformación en estructuras de construcción civil, como por ejemplo represas y oleoductos, teniendo el potencial de reducir dramáticamente sus costos de mantenimiento.

Palabras clave: fibra LPG, fabricación de fibras LPG, fibras de red de período largo, láser CO₂, monitoreo de estructuras, sensor de deformación

ABSTRACT

This work develops a system that fabricates long period grating (LPG) fibers, which are known to be efficient sensors in structural monitoring due to their low cost, noise and corrosion tolerance. CO₂ focused laser is evenly applied to an optical fiber with a length period of 500um between each burning dot by using a set of holders and accurate motorized stages, all controlled from an interface in the computer. Subsequently, it is done a verification that uniform gratings were written to the fibers via microscopy for the visual inspection. The LPG fiber is then used as a deformation sensor to verify its operability. This way, it is ensured that the fibers will have enough quality to be used as deformation sensors for civil structures, e.g. dams and oil pipelines, dramatically reducing their maintenance cost.

Keywords: LPG fiber, long period grating fiber fabrication, CO₂ laser, structural monitoring, fiber deformation sensor

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Estructura interna de la fibra óptica ^[1] | 14 |
| Figura 2. Onda incidente a distintos ángulos, en la interface de dos medios dieléctricos ^[5] | 15 |
| Figura 3. Perfil radial del índice de refracción al interior de la fibra óptica ^[1] | 16 |
| Figura 4. Ángulo y cono de aceptación en la fibra ^[1] | 16 |
| Figura 5. Cono de aceptación para distintos valores de NA (a) y diámetros de núcleo (b) ^[5] | 17 |
| Figura 6. Efectos de la curvatura en la fibra ^[5] | 18 |
| Figura 7. a) Funciones de Bessel. b) Funciones de Bessel modificadas de segunda especie ^[1] | 20 |
| Figura 8. Modos de guiado de onda en la fibra. La imagen es una representación de su sección transversal. La flecha indica la dirección del campo eléctrico ^[1] | 20 |
| Figura 9. Causas de la atenuación en la fibra ^[5] | 21 |
| Figura 10. Gráfica de atenuación en la fibra en función de la longitud de onda ^[5] | 22 |
| Figura 11. Gráfica de transmitancia de una fibra óptica ^[5] | 22 |
| Figura 12. Filtros polarizadores rechazando componentes de una onda ^[1] | 23 |
| Figura 13. Diseños de fabricación de fibras mantenedoras de polarización ^[1] | 24 |
| Figura 14. Perfil de fibra monomodo (a) y multimodo (b) ^[5] | 25 |
| Figura 15. Propagación de rayos de luz en fibras multimodo y monomodo ^[5] | 25 |
| Figura 16. Acoplamiento de fibras ópticas mediante el traspaso de campo evanescente ^[1] . | 28 |
| Figura 17. Líneas de esfuerzo mecánico al aplicarse tensión en una fibra con grietas microscópicas ^[1] | 28 |
| Figura 18. Proceso de fusonado de fibras ^[4] | 30 |
| Figura 19. Fibra con conector terminal de tipo SC ^[4] | 30 |
| Figura 20. Acoplador en un sistema sensor con fibra óptica ^[1] | 31 |
| Figura 21. Diagrama de un sistema de sensado con fibra óptica ^[5] | 33 |
| Figura 22. Arreglo experimental del sensor de nivel descrito ^[7] | 35 |
| Figura 23. Arreglo experimental del sensor de flujo descrito ^[8] | 35 |
| Figura 24. Arreglo experimental del sensor de deformación y temperatura descrito ^[9] | 36 |
| Figura 25. Arreglo experimental del sensor de voltaje AC descrito ^[10] | 36 |
| Figura 26. Fibra con red de Bragg grabada. Las muescas en la fibra son zonas donde se aplicó luz de alta energía ^[1] | 37 |
| Figura 27. Variación del índice de refracción a lo largo de una red de Bragg ^[1] | 38 |
| Figura 28. Funciones de amplitud de campo para la onda normal y contraria ^[1] | 39 |
| Figura 29. Fibra LPG y su principio de funcionamiento ^[5] | 40 |
| Figura 30. Proceso de fabricación de fibras ópticas tipo LPG usando láser CO2. | 41 |
| Figura 31. Espectro de transmitancia para una red LPG | 42 |
| Figura 32. Gráfica de corrimiento de longitud de onda versus variación de temperatura en fibras LPG | 44 |
| Figura 33. Montaje de fibras sobre estructuras de concreto ^[1] | 46 |
| Figura 34. Multiplexación en frecuencia de sensores de fibra ^[1] | 47 |
| Figura 35. Diagrama de bloques del sistema | 49 |
| Figura 36. Diseño mecánico general | 50 |
| Figura 37. Diseño mecánico de base horizontal y soporte de fibras | 50 |
| Figura 38. Esquema eléctrico de la protección implementada | 51 |
| Figura 39. Láser de CO2 | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 40. Base móvil horizontal | 53 |
| Figura 41. Controlador de motor a pasos de movimiento horizontal | 53 |
| Figura 42. Motor a pasos para movimiento vertical..... | 54 |
| Figura 43. Controlador de motor a pasos de movimiento horizontal | 54 |
| Figura 44. Placa Arduino Nano | 54 |
| Figura 45. Coolers para ventilación forzada de láser | 55 |
| Figura 46. Interfaz principal para grabado de redes en fibra..... | 56 |
| Figura 47. Interfaz gráfica para control de láser CO2..... | 57 |
| Figura 48. Interfaz gráfica para control motor de movimiento horizontal..... | 58 |
| Figura 49. Interfaz gráfica para control motor de movimiento horizontal..... | 59 |
| Figura 50. Pruebas de funcionamiento de láser | 60 |
| Figura 51. Prueba de funcionamiento de controlador de láser..... | 61 |
| Figura 52. Pruebas de funcionamiento de base móvil horizontal..... | 62 |
| Figura 53. Circuito en funcionamiento para control de motor de movimiento horizontal..... | 63 |
| Figura 54. Configuración de láser | 64 |
| Figura 55. Configuración de Motor Horizontal..... | 64 |
| Figura 56. Configuración de Motor Vertical | 65 |
| Figura 57. Vista frontal de láser incidente sobre fibra | 65 |
| Figura 58. Puesta en marcha de programa principal | 66 |
| Figura 59. Montaje final del sistema | 67 |
| Figura 60. Soporte principal de fibra | 67 |
| Figura 61. Fibra tipo LPG grabada por el sistema final..... | 69 |
| Figura 62. Utilización de microscopio con acercamiento x40. Se cuantifica el diámetro de la fibra y del láser focalizado. | 69 |
| Figura 63. Proceso de fusonado de fibra LPG (ubicada al interior del fusionador) con pigtailes que poseen conector | 70 |
| Figura 64. Disposición del experimento de sensor de deformación en configuración voladizo | 71 |
| Figura 65. Señal de deformación obtenida | 71 |
| Figura 66. Esquema de configuración de voladizo..... | 72 |

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|-----------|
| AGRADECIMIENTOS | 3 |
| RESUMEN | 4 |
| ABSTRACT | 5 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 6 |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | 8 |
| | |
| INTRODUCCIÓN..... | 10 |
| | |
| CAPÍTULO 1. LA FIBRA ÓPTICA | 14 |
| 1.1. Ondas de luz en la fibra..... | 15 |
| 1.1.1. Refracción y reflexión en la fibra | 15 |
| 1.1.2. Guiado de onda | 18 |
| 1.1.3. Atenuación y espectro de transmitancia | 21 |
| 1.1.4. Polarización | 23 |
| 1.2. Tipos de fibra óptica..... | 24 |
| 1.3. Láseres y fotodetectores | 26 |
| 1.4. Acoplamiento de fibras | 27 |
| 1.5. Propiedades mecánicas de la fibra óptica..... | 28 |
| 1.6. Equipamiento relacionado con fibras ópticas..... | 29 |
| | |
| CAPÍTULO 2. SENSORES DE FIBRA ÓPTICA..... | 32 |
| 2.1. Fibras ópticas como sensores | 32 |
| 2.2. Tipos de sensores de fibra óptica | 33 |
| 2.3. Redes de Bragg..... | 37 |
| 2.4. Redes LPG..... | 40 |
| 2.4.1. Técnicas de fabricación de sensores basados en redes LPG..... | 40 |
| 2.4.2. Transmitancia de luz de fibras LPG..... | 41 |
| 2.4.3. Medición de deformación con fibras tipo LPG | 44 |
| 2.5. Monitoreo de estructuras | 44 |
| 2.5.1. Montaje de sensores estructurales..... | 45 |
| 2.5.2. Sensores multiplexados y distribuidos..... | 46 |
| | |
| CAPÍTULO 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL PARA FABRICACIÓN AUTOMATIZADA DE REDES LPG | 48 |
| 3.1. Diseño e implementación del sistema | 48 |
| 3.1.1. Diagrama de bloques..... | 48 |
| 3.1.2. Diseño mecánico..... | 49 |
| 3.1.3. Diseño eléctrico | 49 |
| 3.1.4. Equipo y software utilizados..... | 52 |
| 3.2. Automatización del proceso de fabricación de redes LPG | 56 |
| 3.2.1. Programa principal..... | 56 |
| 3.2.2. Manejo de láser CO2 | 57 |
| 3.2.3. Control de base móvil para movimiento horizontal de fibras..... | 58 |
| 3.2.4. Control de motor a pasos para movimiento vertical de fibras | 58 |

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y APLICACIONES | 60 |
| 4.1. Puesta en marcha del sistema | 60 |
| 4.1.1. Pruebas de equipos por separado | 60 |
| 4.1.2. Pruebas de equipos en conjunto | 63 |
| 4.2. Obtención de fibras LPG uniformes..... | 68 |
| 4.3. Aplicación de fibra LPG como sensor de deformación | 70 |
| CONCLUSIONES | 73 |
| BIBLIOGRAFÍA | 74 |
| ANEXOS | 76 |

INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas, se ha observado un constante crecimiento de los proyectos de construcción, teniéndose hoy en día edificaciones de gran envergadura, tales como puentes, represas, oleoductos, etc. La seguridad de dichas construcciones es un tema crítico, ya que si algún fallo ocurriera en la integridad de las estructuras, podría traer como consecuencia daños severos, pérdidas humanas y materiales. Para prevenirlo, se han venido investigando y desarrollando sistemas que permitan monitorearlas en tiempo real y reaccionar ante cualquier fallo, mejorando así la confiabilidad, además de facilitar el mantenimiento preventivo de zonas en que la estructura se encuentre desgastada.

Tradicionalmente, para tal fin se han usado sensores de tipo mecánicos, piezoeléctricos, radar, entre otros. Estas tecnologías tienen un alto costo, ya que si se quiere medir la deformación en múltiples locaciones, se requiere un sensor en cada punto. Por otra parte, necesitan usualmente mayor mantenimiento y se dificulta su uso en ambientes corrosivos o de altas temperaturas.

Es por ello que se han desarrollado sistemas monitoreo de estructuras usando fibras ópticas, que no se desgastan como el cobre, no se ven afectadas por el ruido electromagnético, poseen resistencia a la temperatura, y con un solo tendido de fibra es posible abarcar múltiples puntos de medición, lo cual disminuye el costo.

En la tesis se desarrolla un sistema automatizado que permite fabricar sensores de fibra óptica de tipo LPG (Long Period Grating, o red de período largo), que es obtenido al realizar diminutas cavidades a la fibra en puntos espaciados por un período del orden de micras, a través de un láser de CO₂. Para tal fin, se debe realizar un estudio de los aspectos teóricos de estos sensores, diseñar el hardware y software requeridos, realizar la implementación junto con los aspectos mecánicos y eléctricos necesarios, y finalmente usar el sistema integrado en la fabricación de fibras con una red grabada, que pueda ser usada para la medición de deformación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro del contexto local y global, el rubro construcción desarrolla obras de cada vez mayor extensión y complejidad, lo cual se ve favorecido en el país por el crecimiento económico de los últimos años. Para lograr una alta confiabilidad, se requieren sistemas de monitoreo que permitan facilitar el mantenimiento de la estructura, así como evitar fallas graves y colapsos. Estos sistemas deben ser robustos ante las perturbaciones del medio. Además, para poder mantenerse competitivo en el mercado, los sistemas de monitoreo tienden a ser cada vez más eficientes y de menor costo.

Los sistemas tradicionales piezoeléctricos tienen el problema de no ser adecuados en muchos ambientes en que los sensores se ven afectados por el entorno, tales como ruido electromagnético y lugares corrosivos, además que resultan costosos debido a la gran cantidad de sensores requeridos para monitorear toda la estructura, y por tanto afecta también en los costos de operación por mantenimiento.

Los sistemas basados en tecnología de fibra óptica superan todos estos problemas^[1], y ya se han venido implementando en otros países, obteniendo mejores resultados. Sin embargo, esta tecnología es relativamente nueva y el proceso de fabricación de sensores de fibra óptica para tales aplicaciones aún no se encuentra desarrollado en el Perú, ya que aún se están formando los primeros grupos de investigación en esta rama. Es por ello que resulta de suma importancia adquirir para el país los conocimientos científicos y tecnológicos que conlleven a la implementación de estos sistemas en los proyectos de construcción, ya que el Perú posee muchos recursos energéticos que son aprovechados mediante represas y oleoductos. Así, los costos de operación por monitoreo y mantenimiento se reducirían fuertemente al implementar los sistemas descritos.

HIPÓTESIS

Hipótesis principal

Ante la problemática expuesta, el sistema desarrollado en la presente tesis permitirá obtener sensores de fibra óptica tipo LPG, los cuales tienen ventajas frente a los sensores piezoeléctricos (acelerómetros)^[5], y se demostrará su aplicación en el monitoreo de variables. El equipo final será altamente funcional, robusto y de fácil operación.

Hipótesis secundarias

- Se podrán obtener redes tipo LPG de fibra óptica mediante un proceso de grabado con láser de CO₂.
- El equipo integrado permitirá el control de los parámetros de la red grabada en la fibra: período de la red, potencia y tiempo de exposición del láser, entre otros.
- Las fibras grabadas podrán ser usadas como sensores de deformación

JUSTIFICACIÓN

En el Perú, aún no se ha avanzado mucho en la investigación de este tema, y no se cuenta con un equipo altamente funcional que permita fabricar este tipo de sensores de manera automatizada, de acuerdo a especificaciones de medición requeridas. En la presente tesis, se busca avanzar en este contexto y desarrollar dicho equipo, de modo que permita realizar posteriores estudios de mayor profundidad en esta rama, a la vez que se plantea la implementación de sensores de fibra óptica como solución al monitoreo de estructuras de gran envergadura en proyectos.

OBJETIVOS

Objetivo principal

Realizar el diseño e implementación de un sistema que permita automatizar el grabado de redes tipo LPG en fibras ópticas, para poder aplicarlas como sensores destinados al monitoreo de estructuras civiles.

Objetivos específicos

- Conocer el fundamento teórico que sustenta el uso de fibras ópticas como sensores de monitoreo de construcciones
- Implementar el sistema que automatice la secuencia de fabricación de sensores de fibra tipo LPG, controlado desde la PC, de acuerdo a parámetros introducidos
- Obtener redes de período largo (LPG) en las fibras ópticas, cuyas cavidades serán uniformes en toda la red, sin presentar irregularidades
- Verificar la operatividad de las redes LPG obtenidas como sensores de deformación.

Capítulo 1

LA FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es un filamento delgado fabricado con materiales dieléctricos como sílice fundida, y es usado para la transmisión de ondas de luz a través de largas distancias con bajas pérdidas^[1]. Tienen diversas aplicaciones, tales como medio de comunicaciones, sensores, iluminación, entre otros.

La fibra óptica posee un núcleo por donde viaja la luz, rodeado de un revestimiento refractor (en inglés, “cladding”) que atrapa la luz y permite que esta no se refracte fuera del núcleo, ya que posee menor índice de refracción. El diámetro hasta el cladding suele ser de unos 125 μm . Adicionalmente, la fibra posee un recubrimiento plástico (en inglés, “coating”) que la protege del exterior, gracias al cual la fibra puede durar hasta unos 20 años incluso en ambientes húmedos^[1] (ver figura 1), siendo las plantas nucleares el único lugar en donde no es factible el uso de fibras ópticas, ya que estas se oscurecen en presencia de radiación nuclear^[4].

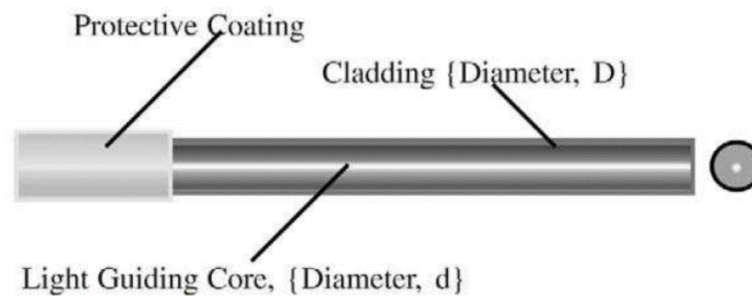


Figura 1. Estructura interna de la fibra óptica^[1].

Las fibras ópticas poseen las siguientes ventajas en su uso^[4]:

- Amplio ancho de banda (tasa de información del orden de los terabits por segundo)
- Compacto debido a su bajo peso y tamaño
- Inmunidad frente a interferencia electromagnética, ya que son no conductores
- No produce riesgo de incendios, debido a que no genera chispas de cortocircuito
- Bajo costo efectivo para altas tasas de información en comparación con sistemas conductores

En el presente capítulo se analiza el modelo físico que explica la transmisión de luz en el interior de las fibras ópticas, así como también los tipos de fibras, el equipamiento relacionado con ellas, y propiedades físicas importantes.

1.1. Ondas de luz en la fibra

1.1.1. Refracción y reflexión en la fibra

Una onda plana que pasa de un medio dieléctrico a otro, se refracta siguiendo la ley de Snell:

$$n_0 \text{sen} \phi_0 = n_1 \text{sen} \phi_1 \quad (1.1)$$

En la figura 2, se muestra dicho fenómeno, en el cual el índice de refracción n_0 es mayor que n_1 . Existe un valor de $\phi_0 = \phi_c$, llamado ángulo crítico, para el cual $\phi_1 = 90^\circ$ (figura 2-b), que puede calcularse a partir de (1.1):

$$\phi_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{n_1}{n_0} \right) \quad (1.2)$$

A partir de dicho ángulo crítico, la onda ya no se refracta, y por el contrario se produce una reflexión total interna^[5]. Aquello precisamente es lo que sucede dentro de la fibra óptica, ya que esta posee un índice de refracción mayor en el núcleo que en el cladding (figura 3).

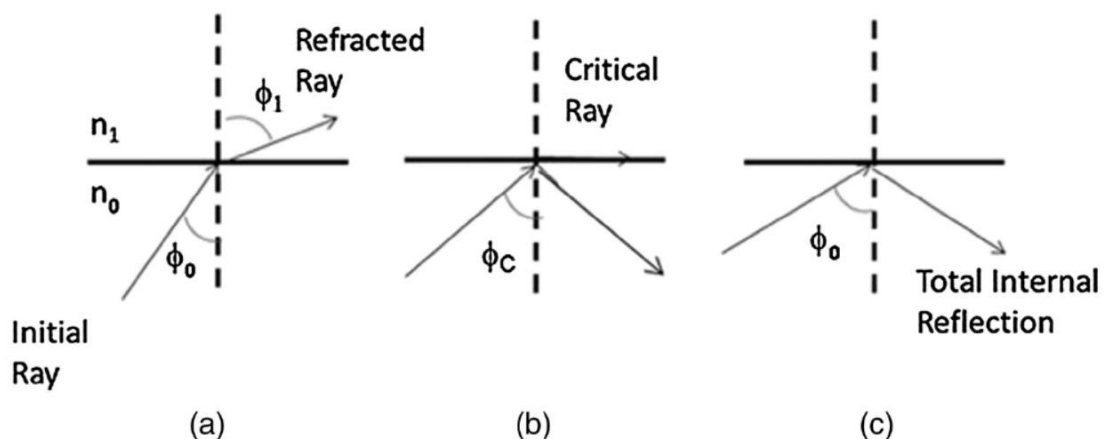


Figura 2. Onda incidente a distintos ángulos, en la interface de dos medios dieléctricos^[5]



Figura 3. Perfil radial del índice de refracción al interior de la fibra óptica^[1]

En la figura 4, se aplican los conceptos previos a la fibra óptica. Se encuentra consignado con notación θ_c el ángulo crítico visto anteriormente. Además, se ha indicado un ángulo de aceptación θ_A que a su vez define un cono de aceptación, que es la región en la cual los rayos de luz incidentes no se refractarán fuera de la fibra.

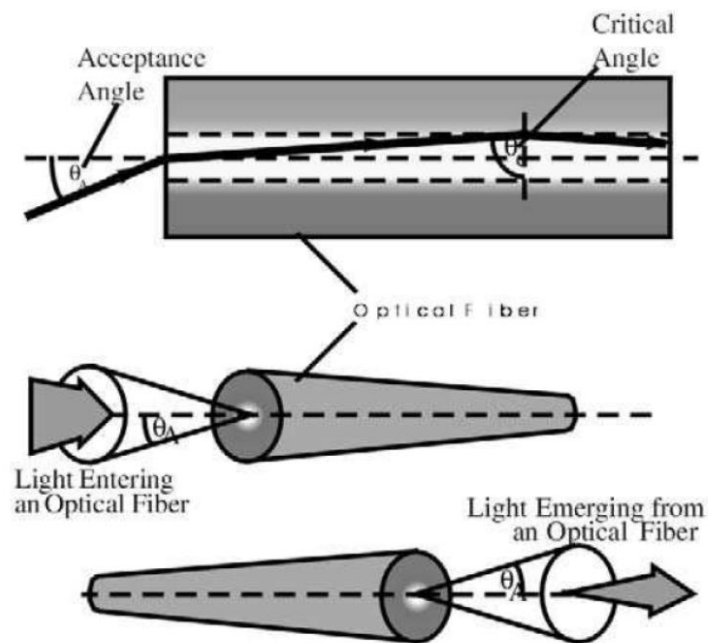


Figura 4. Ángulo y cono de aceptación en la fibra^[1]

Si se asume un índice de refracción del aire igual a 1, entonces, al aplicar (1.1) en la interfaz aire-fibra, y usando (1.2), se puede calcular el ángulo de aceptación:

$$\text{sen}\theta_A = \sqrt{[n_1^2 - n_2^2]} = NA \quad (1.3)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del núcleo y el cladding, respectivamente. A la cantidad NA de (1.3) se le denomina apertura numérica^[1]. Se puede observar que mientras mayor sea la diferencia entre los índices de refracción, mayor será la apertura numérica y el ángulo de aceptación, y por tanto mayor capacidad de aceptación de luz en la fibra (figura 5-a). Esto último también puede lograrse aumentando el diámetro del núcleo, de modo que, con un mismo ángulo de aceptación, se tenga un cono de aceptación de mayor dimensión (figura 5-b).

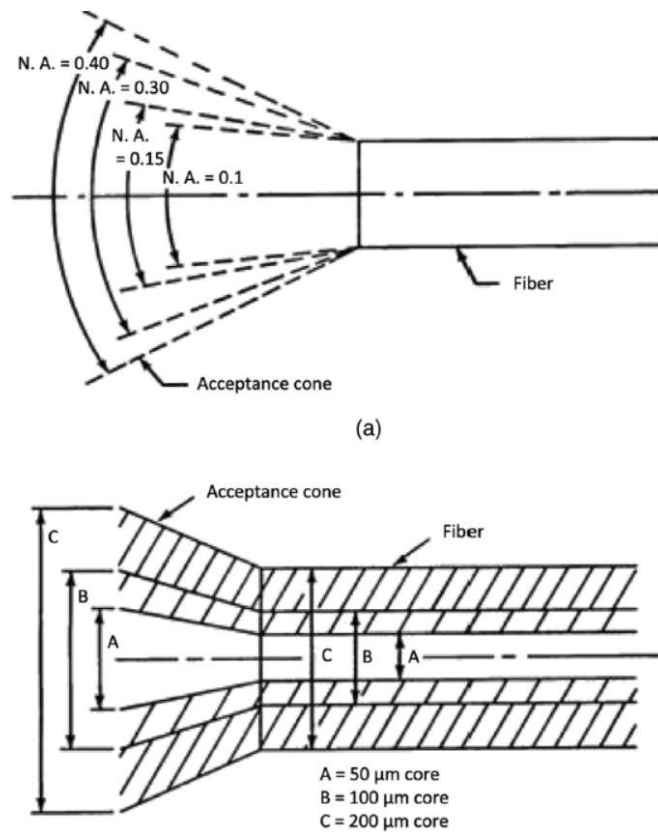


Figura 5. Cono de aceptación para distintos valores de NA (a) y diámetros de núcleo (b)^[5]

En el caso de una fibra óptica curvada, puede analizarse geoméricamente, en la figura 6, que la curvatura provoca que se reduzca el ángulo crítico de ϕ_0 al valor $\phi_0 - \delta$. Por lo tanto, los rayos que incidan con un ángulo entre esos dos valores, se perderán a través del cladding^[5] hacia el exterior.

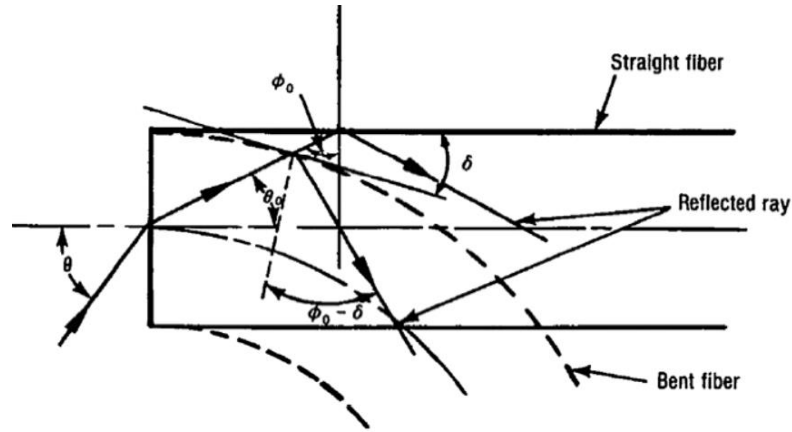


Figura 6. Efectos de la curvatura en la fibra^[5]

1.1.2. Guiado de onda

Con el objetivo de analizar matemáticamente la propagación de radiación electromagnética dentro de la fibra, se plantea el modelo usando ondas planas monocromáticas. Se utilizan además coordenadas cilíndricas, dada la forma geométrica de la fibra. Se parte de la ecuación de onda en medio dieléctrico:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.4)$$

Usando coordenadas cilíndricas y haciendo $\varepsilon\mu = \frac{n^2}{c^2}$ se obtiene:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1.5)$$

Donde se ha usado la notación E para representar una componente genérica del campo por simplicidad, ya que 1.4 es en realidad un sistema de tres ecuaciones diferenciales, uno para cada componente de $\mathbf{E} = (E_r, E_\phi, E_z)$, pero todas ellas cumplen con la misma ecuación diferencial^[1]. Además, según se vio en la figura 3, el índice de refracción en la fibra varía radialmente, es decir, $n = n(r)$. El eje z es el eje principal de la fibra, que es la dirección de propagación, por ello, puede considerarse que la solución tendrá la forma:

$$E(r, \phi, z, t) = E(r, \phi) e^{i(\beta z - \omega t)} \quad (1.6)$$

En el desarrollo de la solución, se asume una constante de propagación $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ que puede tener cualquier dirección para considerar los haces de luz que ingresan a la fibra con

cierto ángulo de inclinación, sin embargo, la ecuación 1.6 representa una onda que se propaga en la dirección del eje de la fibra o eje z, donde β es la constante de propagación en dicho eje. R. Measures desarrolla dicho modelo^[1], llegando al siguiente resultado:

$$E(r, \phi) = A \frac{J_\ell(pr)}{J_\ell(pa)} \cos(\ell\phi), \quad \text{para } r < a \quad (1.7)$$

$$E(r, \phi) = A \frac{K_\ell(\gamma r)}{K_\ell(\gamma a)} \cos(\ell\phi), \quad \text{para } r > a \quad (1.8)$$

$$p \frac{J_{\ell-1}(pa)}{J_\ell(pa)} = -\gamma \frac{K_{\ell-1}(\gamma a)}{K_\ell(\gamma a)}, \quad \text{ecuación de continuidad en } r = a \quad (1.9)$$

Donde:

a es el radio del núcleo

A es una constante de integración

$\ell = 0, 1, 2, \dots$ es un número entero llamado eigenvalor azimutal

J_ℓ es la función de Bessel de primera especie de grado ℓ

K_ℓ es la función de Bessel modificada de segunda especie de grado ℓ

$p = (n_1^2 k^2 - \beta^2)^{1/2}$ es llamada constante de propagación transversal

$\gamma = (\beta^2 - n_2^2 k^2)^{1/2}$ es llamada constante de decaimiento transversal

n_1 es el índice de refracción del núcleo

n_2 es el índice de refracción del cladding

Debido a que p y γ dependen de β , es posible resolver para β la ecuación 1.9, obteniendo m soluciones, lo cual permite decir que $\beta = \beta(\ell, m)$. Cabe resaltar que p y γ reciben dichos nombres ya que en el núcleo se propaga la onda, y en el cladding decae (a este fenómeno se le llama campo eléctrico evanescente). Teniendo en cuenta la figura 7 y la forma de la solución en 1.7 y 1.8, puede decirse que es posible guiar ondas en el núcleo con diferentes modos (lo cual podrá verse también en la sección 1.2), mientras que en el cladding la onda decae. El número ℓ resulta ser el número de superficies de nodos azimutales donde $E = 0$, mientras que m es el número de superficies de nodos radiales en las que se apreciará presencia de intensidad de campo^[1]. Por tanto, dependiendo de las propiedades de la fibra y de las ondas incidentes, se presentarán en la sección transversal de la fibra diversos modos denotados por $LP_{\ell, m}$, que pueden ser encontrados en laboratorio mediante fotodetectores (ver

figura 8). En conclusión, no todos los rayos pueden propagarse en la fibra, sino que solo aquellos que satisfacen 1.5, es decir, la solución 1.7-1.9, lo cual genera un patrón geométrico de luz a la salida de la fibra^[4].

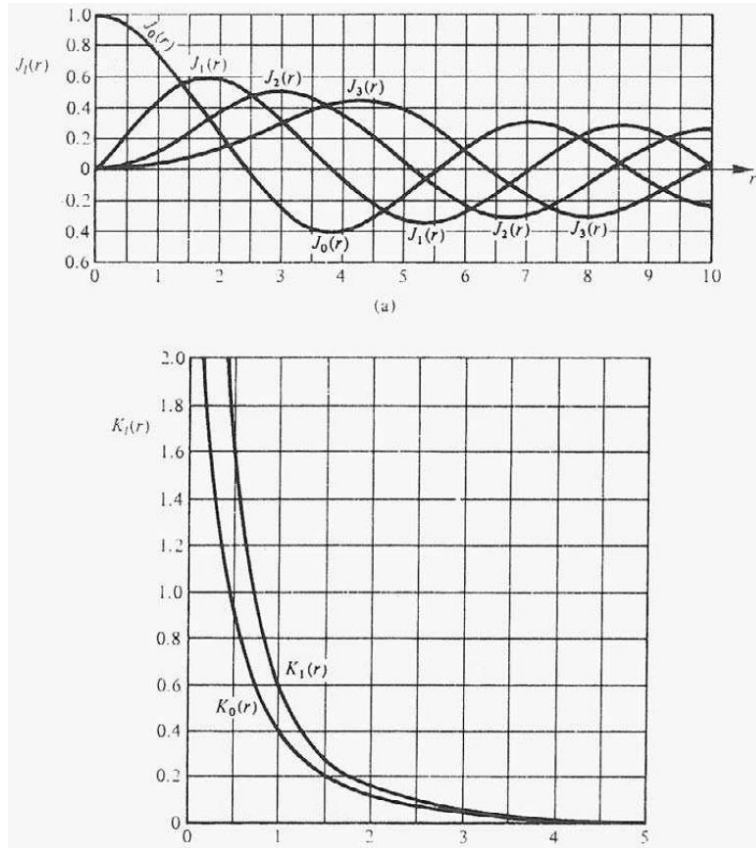


Figura 7. a) Funciones de Bessel. b) Funciones de Bessel modificadas de segunda especie^[1]

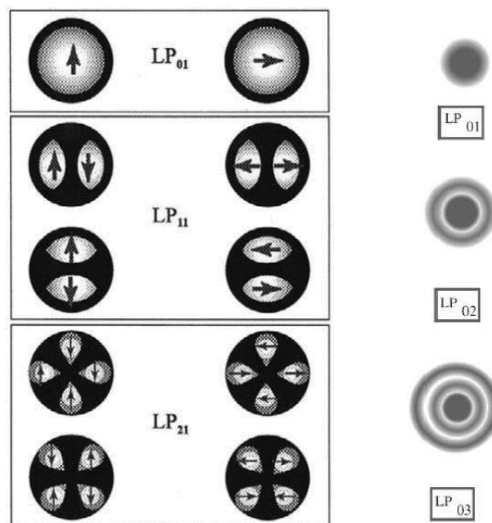


Figura 8. Modos de guiado de onda en la fibra. La imagen es una representación de su sección transversal. La flecha indica la dirección del campo eléctrico^[1]

1.1.3. Atenuación y espectro de transmitancia

La pérdida o atenuación en la fibra queda definida matemáticamente como^[5]:

$$A = -10 \log \frac{P_o}{P_i} \quad (1.10)$$

Donde:

P_o : Potencia de salida

P_i : Potencia de entrada

El signo negativo se toma así por convención. La medida suele realizarse a lo largo de una longitud de 1km, por lo que la unidad de la atenuación se presenta como decibelios por kilómetro (dB/km), las cuales pueden ser incluso menores a 1dB/km en la fibra óptica.

Las principales causas de las pérdidas son: la absorción o dispersión generadas por impurezas, el microdoblamiento, y defectos en el extremo que provocan reflexión de vuelta hacia la fibra (figura 9). Existen sensores de fibra óptica que usan el concepto de atenuación por microdoblamiento como base para detectar deformaciones en la fibra^[5]. El autor J. Powers desarrolla a detalle el modelo matemático de todos estos tipos de pérdidas^[4].

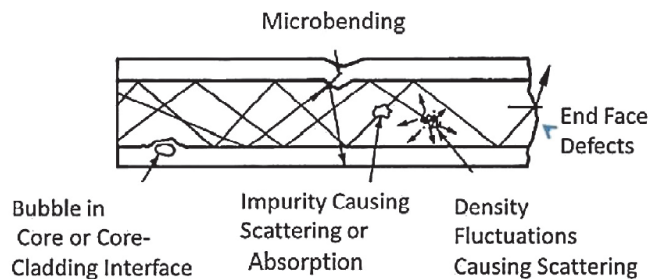


Figura 9. Causas de la atenuación en la fibra^[5]

La atenuación es una función que depende principalmente de la longitud de onda de la fuente (figura 10). Para las longitudes de onda más bajas, se presenta una atenuación debido a absorción ultravioleta del material de la fibra sumado al fenómeno de dispersión de Rayleigh, el cual es proporcional a $(1/\lambda^4)$ y se debe a irregularidades microscópicas en el índice de refracción y que son generadas durante la fabricación de la fibra óptica^[1]. Los picos de atenuación que se observan en la gráfica, como el ubicado en $1.4\mu\text{m}$, son debidos a impurezas de ión OH^- que posee la fibra debido a la presencia de humedad al ser fabricada.

La atenuación para altas longitudes de onda se deben a absorción infrarroja del material de la fibra.

Teniendo en cuenta la gráfica, existen dos ventanas de mínima atenuación ubicadas alrededor de 1.3 y 1.55 μm , que es en donde usualmente se trabajan las aplicaciones^[1]. Debido a su menor atenuación, los sistemas más modernos se desarrollan para el rango de 1528 a 1561nm^[5].

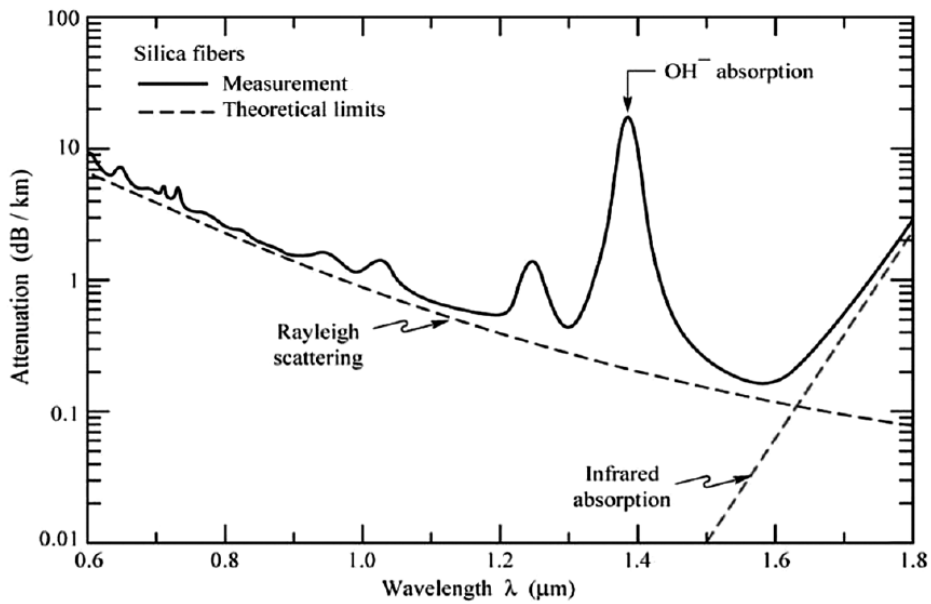


Figura 10. Gráfica de atenuación en la fibra en función de la longitud de onda^[5]

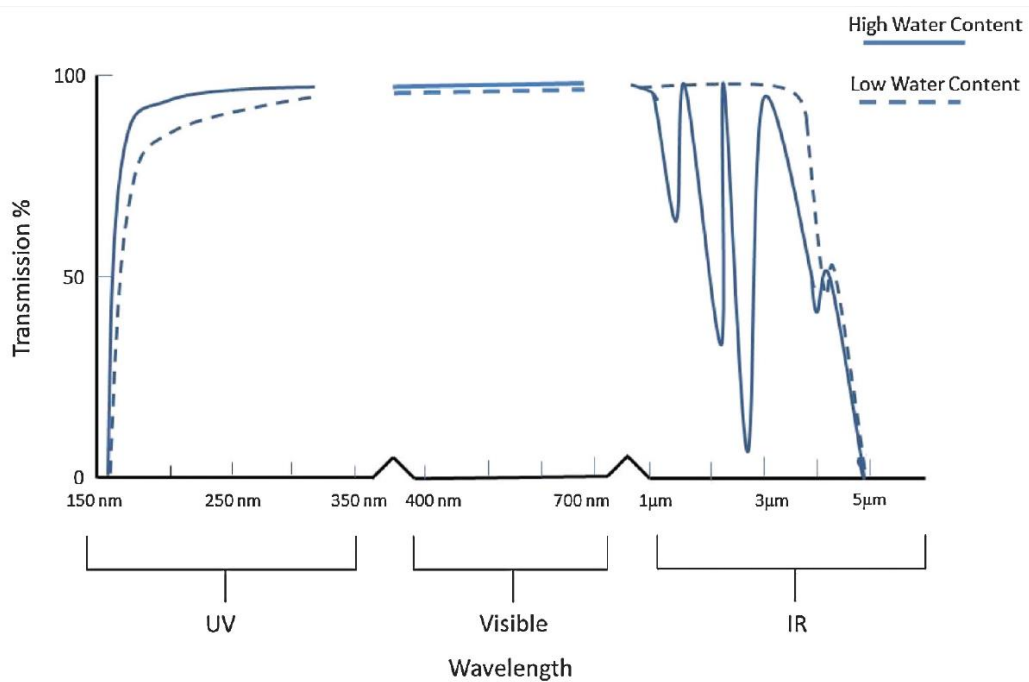


Figura 11. Gráfica de transmitancia de una fibra óptica^[5]

Existe otra gráfica que suele ser usada en la literatura, que es la de transmisión o transmitancia (figura 11), que es simplemente lo inverso de la gráfica de atenuación, es decir, el valor absoluto de la ecuación 1.10, y suele darse en dB/km o porcentaje. Por ejemplo, si no hubiese atenuación alguna, su valor sería 0dB/km, y correspondería a una transmitancia del 100%.

1.1.4. Polarización

La polarización de las ondas está referida a la dirección del campo eléctrico con la que se propagan. En la figura 12, se observa una onda que posee dos componentes de campo perpendiculares y dos filtros polarizadores cuya dirección de polarización está indicada en ellos mediante una flecha, uno es vertical y el otro horizontal. Después del primer filtro, solo puede pasar la componente vertical, y por tanto, luego del segundo filtro, no se observará ninguna presencia de campo.

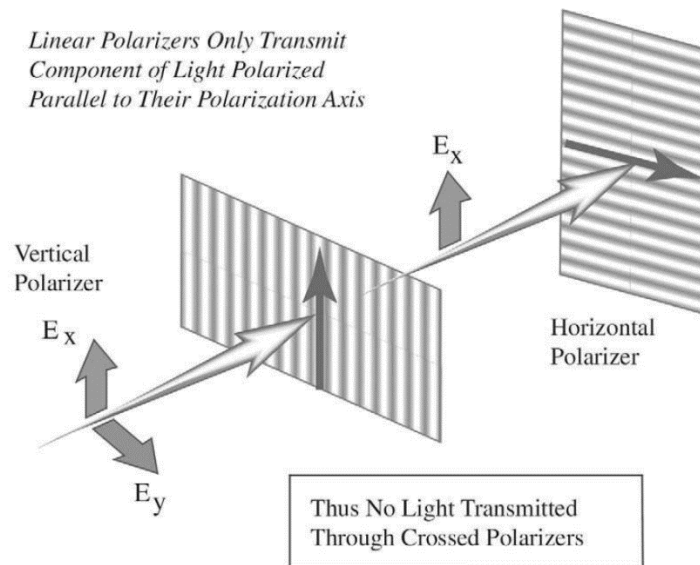


Figura 12. Filtros polarizadores rechazando componentes de una onda^[1]

La fibra óptica puede cambiar la polarización de la luz que incide en ella, lo cual ocurre cuando se presenta un esfuerzo mecánico en la fibra^{[1][5]}. Esto puede ser perjudicial para los sensores de fibra, ya que podría presentarse una atenuación de la intensidad de campo que no proviene del método de medición del sensor, los cuales usualmente se basan en medir atenuaciones de acuerdo a longitudes de onda, como se verá en el capítulo 2.

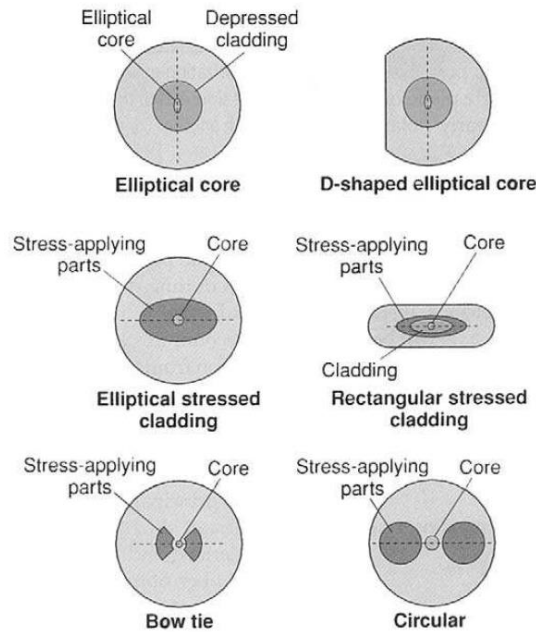


Figura 13. Diseños de fabricación de fibras mantenedoras de polarización^[1]

Una posible solución a ello es el uso de fibras ópticas mantenedoras de polarización, que son fabricadas de un modo especial para evitar tales efectos. Aquello se logra mediante la aplicación de un esfuerzo en el núcleo de la fibra mediante asimetrías en el proceso de fabricación (figura 13). El resultado es una fibra que ya no es un medio isotrópico, sino llamado birrefringente, es decir, que posee índices de refracción distintos en las direcciones transversales. Sin embargo, esta solución resulta costosa^[1], y es válida solo para aplicaciones especiales.

1.2. Tipos de fibra óptica

Existen dos tipos de fibra óptica, las monomodo y las multimodo (figura 14). La primera posee un núcleo mucho más pequeño, con diámetro del orden de 5 a 10 μm , y son usadas ampliamente en telecomunicaciones de alta velocidad y sensores. La segunda posee diámetros de núcleo de hasta 100 μm , y es la solución más económica cuando la aplicación no requiere grandes distancias ni grandes velocidades de transmisión, y también son usados en aplicaciones muy específicas de sensores^[4].

Existen además diseños de fabricación de fibras para aplicaciones específicas^[4] que requieran muy bajas pérdidas, insensibilidad al microdoblamiento, o ambientes extremos, lo cual se logra modificando su estructura o composición, así como mejoras en el coating o revestimiento externo.

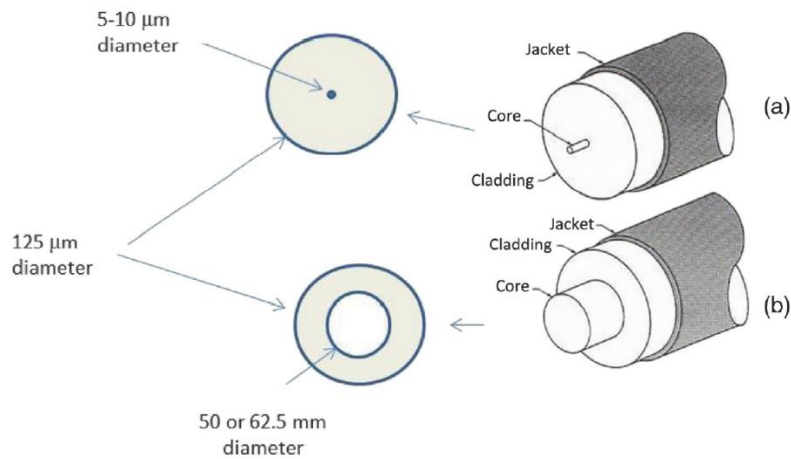


Figura 14. Perfil de fibra monomodo (a) y multimodo (b)^[5]

En las fibras monomodo, debido al tamaño del núcleo, las ondas principalmente viajan de manera axial, mientras que en las multimodo, es posible guiar distintos modos de luz, lo cual quiere decir que las ondas pueden propagarse a través de diferentes caminos (los cuales cumplen con 1.7-1.9, como se explicó en la sección 1.1.2). En la figura 15 se ilustra dicho escenario.

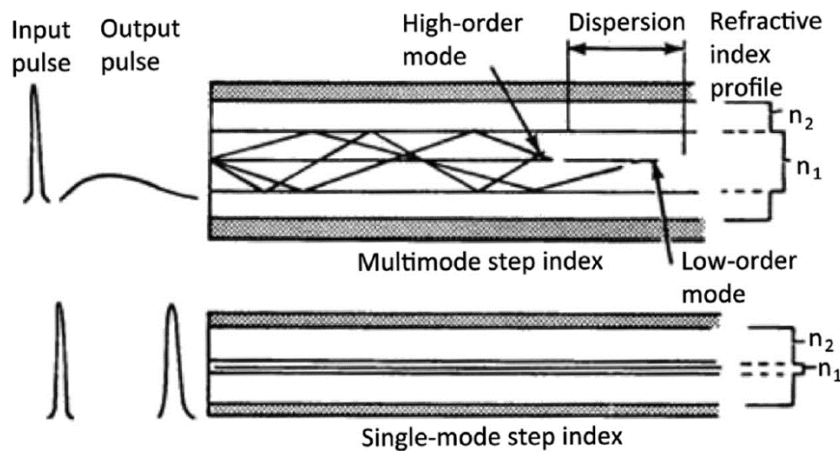


Figura 15. Propagación de rayos de luz en fibras multimodo y monomodo^[5]

En la fibra monomodo, los rayos que ingresan viajan en dirección axial. En cambio, en la fibra multimodo, los rayos que ingresan a diferentes ángulos, viajan distancias diferentes (los que ingresan con mayor ángulo recorren más longitud), por lo que en la salida se notará una dilatación temporal de la intensidad con respecto al pulso de entrada. En otras palabras, en la fibra multimodo ocurre una mayor dispersión de luz en comparación con la monomodo^[5].

Aquello es el principal motivo por el cual las aplicaciones de sensores de fibra óptica usan principalmente fibras monomodo, ya que la dispersión de las multimodo genera atenuaciones en la intensidad de ondas de luz, pero que no forman parte de la medición, sino que es inherente a la fibra. Debido a que la atenuación no es uniforme a lo largo de todas las longitudes de onda, entonces se dificulta la linealización de la medición, que es una característica importante en todo sensor. Otro detalle es que dada la dirección de propagación, en la fibra monomodo solo se presentan los modos LP₀₁, LP₀₂, LP₀₃, etc.

1.3. Láseres y fotodetectores

Las fuentes de luz pueden categorizarse en dos tipos: i) de banda ancha e incoherentes y ii) de banda angosta y coherentes. La coherencia es una propiedad de las ondas de luz que indica que su fase no varía en el tiempo^[1], es decir, por ejemplo, que en el término imaginario $e^{i\beta z}$ de la onda, el exponente no depende del tiempo, por lo que, suponiendo que se tenga una medición de la fase del campo en cierto instante, sería posible predecir la medición de fase en cualquier otro. Los láseres son fuentes fuertemente coherentes, y entran en el segundo tipo de los mencionados. Por otra parte, la radiación espontánea o no láser como la de un foco, es no coherente, y pertenece al primer tipo.

La coherencia de una fuente puede describirse matemáticamente mediante dos términos llamados longitud de coherencia (ℓ_c) y tiempo de coherencia (τ_c), que se calculan mediante las siguientes expresiones^[1]:

$$\ell_c = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad \tau_c = \frac{1}{\Delta\nu} \quad (1.11)$$

Donde $\Delta\lambda$ es el ancho de banda de longitudes de onda presentes en la luz, y $\Delta\nu$ es el ancho de banda de frecuencias.

El análisis de la coherencia de la fuente es importante en el fenómeno de interferencia de ondas, ya que en una aplicación de interferómetros como el de Michelson, la interferencia se produce únicamente dentro de los rangos de longitud y tiempos de coherencia. En los sensores de fibra óptica, la interferometría es la base de algunos tipos de sensores, lo cual se verá en el capítulo 2.

Otra característica resaltante de los láseres es el ancho de banda de longitudes de onda de luz con las que emite, cuyo rango suele estar contenido en el espectro visible o infrarrojo. Tal como se vio en la sección 1.1.3, las fibras ópticas tienen ciertos rangos de longitud de onda en las que transmiten de forma más lineal, y la linealidad es importante para las aplicaciones como sensores.

Los fotodetectores o receptores ópticos son los dispositivos encargados de transformar la señal óptica en una señal eléctrica que puede ser interpretada más adelante por otro equipo, como un osciloscopio. Al igual que en los láseres, los fotodetectores emplean dispositivos electrónicos de estado sólido, los cuales son portables, de bajo consumo y económicos^[4].

Estos equipos receptores incluyen etapas de amplificación y procesamiento electrónico, los cuales son diseñados de forma tal que no se produzca una fuerte contaminación de la señal por ruido^[4], ya que las señales ópticas son típicamente de baja intensidad. Además, en la etapa de procesamiento y filtrado de la señal, se realiza un diseño que no modifique el espectro de frecuencias de la señal óptica. Tales especificaciones de intensidad y ancho de banda son encontradas en la hoja de datos del equipo receptor, cuyos rangos de operación deben ser considerados al momento de seleccionar el equipo para cierta aplicación deseada.

Puede encontrarse el análisis de láseres y receptores por J. Powers^[4], donde se detallan las propiedades y modelamiento matemático de dichos dispositivos.

1.4. Acoplamiento de fibras

Cuando se acercan dos fibras ópticas, entre ellas ocurre un intercambio de potencia óptica, siempre y cuando sus cladding no sean tan grandes^[1]. El principio físico de este fenómeno es el traspaso del campo evanescente (descrito en la sección 1.1.2) de una fibra a otra (figura 16). En el desarrollo matemático se involucra los parámetros de fabricación de la fibra, los índices de refracción, la longitud y modos de onda, la longitud de contacto, el espaciamiento y el ancho de los cladding^[4]. Al diseñar correctamente los diversos parámetros, se puede incluso realizar una transferencia total de potencia una fibra a la otra,

lo cual es posible por interferencia destructiva que ocurre en la primera fibra. El análisis detallado es desarrollado por R. Measures^[1].

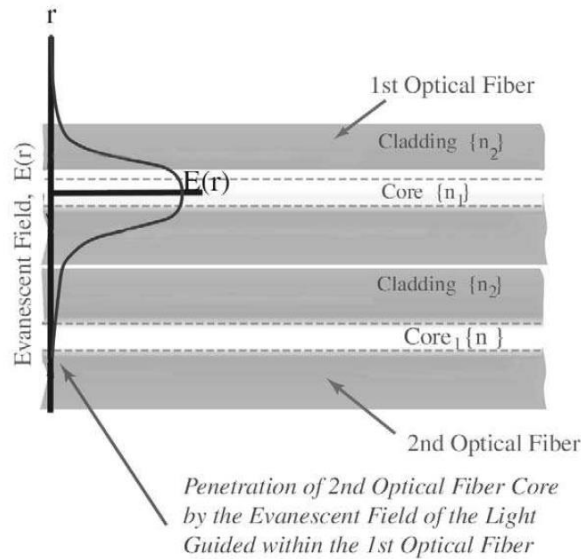


Figura 16. Acoplamiento de fibras ópticas mediante el traspaso de campo evanescente^[1]

1.5. Propiedades mecánicas de la fibra óptica

Las fibras ópticas son materiales elásticos, y pueden doblarse hasta cierto punto de ruptura. El tiempo de vida de la fibra dependerá básicamente del esfuerzo al cual es expuesta y las condiciones ambientales, siendo el revestimiento exterior o coating es quien la protege de ello. Dichas condiciones producen en la fibra pequeñas grietas microscópicas en la superficie de la fibra, las cuales reducen en gran medida su resistencia mecánica, siendo más susceptibles a rupturas (figura 17).

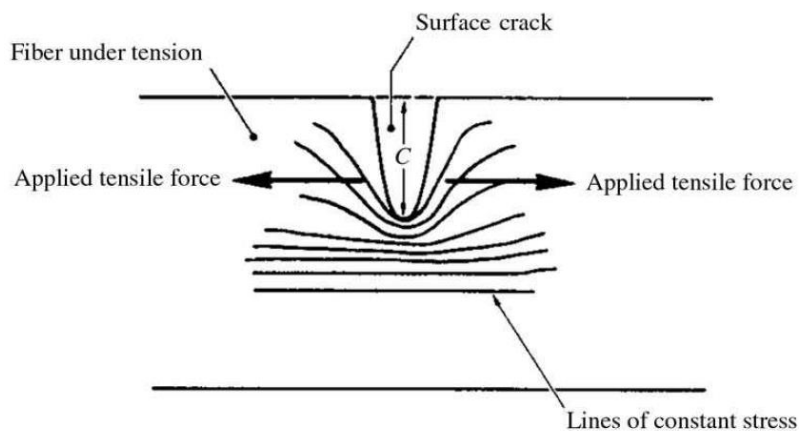


Figura 17. Líneas de esfuerzo mecánico al aplicarse tensión en una fibra con grietas microscópicas^[1]

Para el caso de sensores de fibra óptica, es normal que se realice en las fibras un tratamiento que modifica su estructura física, así como también que se les aplique tensión axial. Por ello es importante tener en consideración las propiedades mecánicas en el proceso de fabricación de sensores de fibra óptica, ya que se debe ser muy cuidadoso en su manipulación para que estas no se fracturen.

Si se desea realizar un estudio más detallado de los puntos de ruptura de la fibra en función del esfuerzo mecánico, así como un análisis estadístico de las fallas en fibras para un período determinado, pueden aplicarse el modelo de Griffith y el modelo estadístico de Weibull^[1].

1.6. Equipamiento relacionado con fibras ópticas

Empalmes y fusionador

Dado que un sistema de fibra óptica puede ser desplegado a lo largo de varios kilómetros, es necesario tener una forma de empalmar o juntar cables de fibra, ya sea para expandir o reemplazar los cables de fibra. En el caso del cableado eléctrico, para esta operación es suficiente con tocar dos cables de cobre porque el voltaje se transmite al hacerlo, sin embargo, para el caso de las fibras ópticas, la luz debe seguir viajando a lo largo de un mismo núcleo. Para lograr ello, el empalme de dos fibras debe ser preciso para que los núcleos de ambas fibras coincidan. A dicho proceso de empalme se le llama fusión^[4], y al equipo con que se realiza se llama fusionador o empalmadora de fibras. En la figura 18 se ve el proceso de fusión de fibras. En el fusionador se juntan de manera precisa las fibras, y el equipo aplica calor en forma de arco eléctrico en la juntura, de forma tal que se derrite el material y se fusiona. Cualquier desalineamiento será corregido por sí mismo gracias a la tensión superficial mientras se enfría la fibra. Cabe resaltar que los empalmes, así como también cualquier tipo de dispositivo de conexión en los sistemas de fibra óptica, generan una pequeña pérdida o atenuación^[1].

Conectores

Los conectores son partes terminales de la fibra que permiten conectarla con algún equipo transmisor o receptor de luz, siendo además desmontables, es decir, puede desconectarse y volver a conectarse la fibra a los equipos. Los conectores están alineados de

forma precisa a la fibra, de manera que se produzca una conexión confiable, al mismo tiempo que protege dicha conexión de las condiciones ambientales de humedad y polvo presentes^[4]. Los conectores están estandarizados, y los más conocidos a nivel comercial son los conectores tipo SC, LC, FC y ST. En la figura 19 se muestra una fibra con conector SC. Otro término muy utilizado es el de pigtail, que es una fibra óptica que por un extremo posee un conector de algún tipo, y en el otro extremo está la fibra expuesta, lista para ser fusionada con otra.

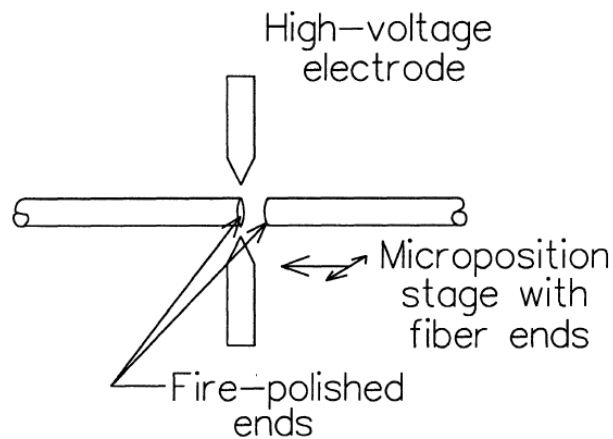


Figura 18. Proceso de fusión de fibras^[4]

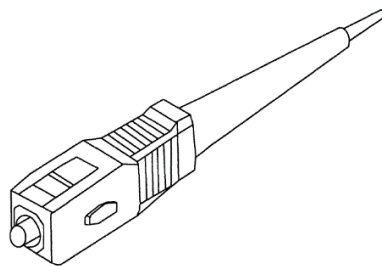


Figura 19. Fibra con conector terminal de tipo SC^[4]

Acopladores

Para muchos sistemas de sensores de fibra óptica, es requerido dividir la potencia óptica en fibras distintas, o unir las en una sola. Este proceso de acoplamiento fue descrito en la sección 1.4, y el equipo que permite implementarlo es llamado acoplador de fibras. En la figura 20, puede apreciarse uno de los usos del acoplador. La fuente emite luz, cuya potencia es dividida en el acoplador, la cual una parte se transmite hacia un fotodetector de referencia (que sirve para conocer la onda de luz original), y la otra parte se transmite hacia el sensor

de fibra en sí. Al reflejarse la onda en el sensor, esta regresa hacia el acoplador, y se vuelve a dividir, transmitiéndose también hacia otro fotodetector de sensado.

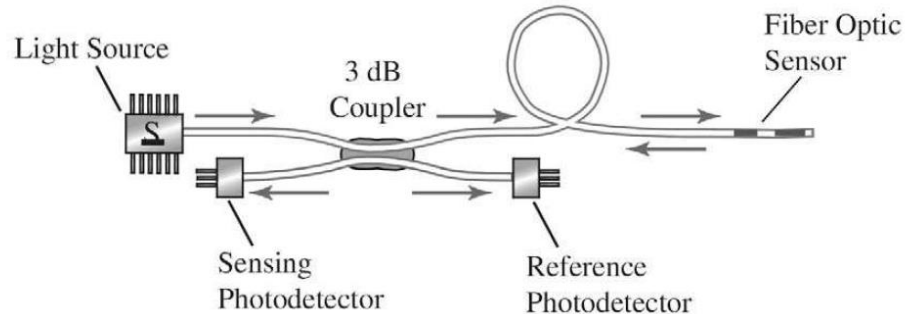


Figura 20. Acoplador en un sistema sensor con fibra óptica^[1]

Analizadores espectrales

Son equipos que pueden medir las longitudes de onda de las señales ópticas, y obtienen las gráficas espectrales de transmitancia de luz. El equipo se conecta mediante un pigtail a la fibra. Con dichas gráficas de transmitancia, es posible monitorear en tiempo real los parámetros de la fibra. La resolución que alcanzan puede llegar a 0.3nm a lo largo de un rango de 600nm de longitud de onda^[1]. La desventaja es que este equipo es muy costoso, por lo que, para ciertas aplicaciones, puede usarse en su lugar otro equipo más sencillo llamado filtro óptico, que permite regular el paso de ciertas longitudes de onda, pudiendo así elaborarse una gráfica de transmitancia.

Capítulo 2

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

2.1. Fibras ópticas como sensores

Las redes de fibras ópticas pueden ser utilizadas como mecanismo de sensado de parámetros como: deformación, esfuerzo, vibración, temperatura, índice de refracción, humedad, pH, nivel, flujo, corriente, sonido, viscosidad, campo magnético, entre otros^{[3] [6]}. Existe en la literatura una gran variedad de aplicaciones y tipos especiales de fabricación y/o modificación de fibras para que puedan emplearse como sensores. Se presentan aplicaciones en las cuales usar fibra óptica resulta mucho más económico que una solución basada en los tipos de sensores convencionales (termocuplas, acelerómetros, etc.), ya que en dichas aplicaciones un sistema de fibras tiene mejores prestaciones y resulta más económico en cuanto a implementación y mantenimiento.

Las ventajas de usar sistemas de sensores basados en fibra óptica frente a las tecnologías convencionales son las siguientes^{[3] [6]}:

- Es factible de usarse en ambientes corrosivos y húmedos por el material de la fibra
- Poseen inmunidad al ruido electromagnético ya que trabajan con ondas de luz
- No presentan riesgo de explosión ya que no producen arcos eléctricos
- Las fibras poseen menor tamaño, con lo cual pueden ser usadas en espacios reducidos
- Puede desplegarse para realizar mediciones a lo largo de varios kilómetros sin necesidad de usar un componente activo adicional más que la fuente de luz
- Una misma red de fibra puede diseñarse para medir distintos parámetros a la vez
- La industria de las telecomunicaciones ha beneficiado a la tecnología de fibras, mejorando sus características y reduciendo cada vez más sus costos de producción
- Alta sensibilidad y rango de resolución

Los sensores de fibra están basados en un principio de operación que consiste en realizar una modulación de la magnitud a sensar en ciertos parámetros ópticos, tales como la intensidad, polarización, fase o longitud de onda. Para ello, la fibra suele ser diseñada o

modificada de modo que las variaciones en las magnitudes físicas a medir provoquen en ellas un cambio en sus propiedades ópticas^[5]. Así, la fibra no solo es un medio de transporte para la comunicación de la señal a ser enviada al detector, sino que a la vez también puede ser el transductor que realiza el sensado. En la figura 21 se presenta lo descrito.

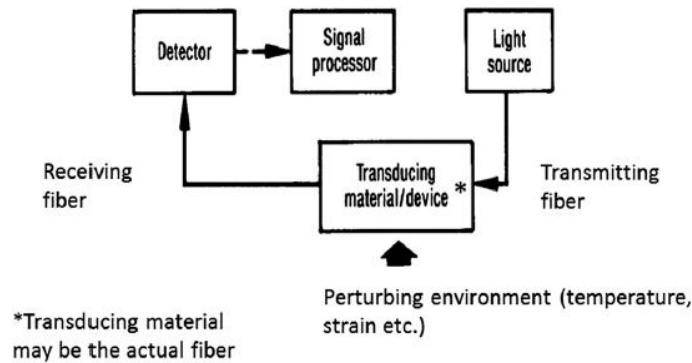


Figura 21. Diagrama de un sistema de sensado con fibra óptica^[5]

Debido a tales prestaciones, y las mejoras e investigación realizadas a lo largo de las últimas décadas, los sensores de fibra óptica pueden aplicarse en una gran variedad de campos, tales como la industria química, medicina, energía, alimentos, construcción, medios de transporte^[6].

2.2. Tipos de sensores de fibra óptica

Los sensores de fibra pueden clasificarse en dos grupos: intrínsecos y extrínsecos. Los sensores intrínsecos son aquellos en los que la modulación de la magnitud ocurre dentro de la fibra, mientras que los sensores extrínsecos son aquellos en que la modulación la realiza un transductor externo. Dentro de la categoría de los intrínsecos entran los sensores basados en interferometría como las fibras con redes de Bragg (FBG, por sus siglas en inglés) y las fibras con redes de período largo (LPG, por sus siglas en inglés), ya que estos tipos de fibras (analizadas en las siguientes secciones 2.3-2.4) reaccionan de manera directa ante variaciones de deformación.

Otra forma de clasificación es según el principio de operación del sensor. Las cinco categorías de acuerdo a ello son las siguientes^[5]:

- Sensores de fase modulada: comparan la fase de la fibra que se comporta como sensor, contra una fibra de referencia.
- Sensores de intensidad modulada: se basan en el cambio que produce la magnitud física a medir en la intensidad o potencia de luz obtenida en el fotodetector.
- Sensores de longitud de onda modulada: su principio se basa en el cambio de longitudes de onda en presencia de la variable de medición. Los sensores a los que atañe el presente estudio, FBG y LPG, pertenecen a este grupo.
- Sensores basados en polarización: son aquellos que miden modificaciones en el estado de polarización de la luz, como se estudió en la sección 1.1.4.
- Sensores basados en dispersión: están asociados con tres fenómenos de dispersión: Rayleigh, Raman y Brillouin, que guardan relación con impurezas en la fibra. Una parte de la luz que ingresa a la fibra es dispersada y reflejada debido a dichas impurezas, y es medida por un reflectómetro. La variable de medición, como temperatura o deformación, causa variaciones en dicha luz dispersada, permitiendo así cuantificarla.

También pueden clasificarse los sensores de fibra según la variable de medición^[6]. Para tener una claridad del alcance y diseños que se realizan en la detección de diversas magnitudes, a continuación se presenta una lista de algunas aplicaciones encontradas en la literatura:

- Sensor de nivel: P. Nath et al^[7] desarrollan un sensor de nivel de líquido basado en intensidad. La punta terminal de una fibra se encuentra al aire, y al sumergirse en el líquido, cambia el índice de refracción que rodea la punta, permitiendo que ocurra una reflexión total interna (figura 22), con lo cual se detecta una potencia óptica, indicando así presencia de nivel.

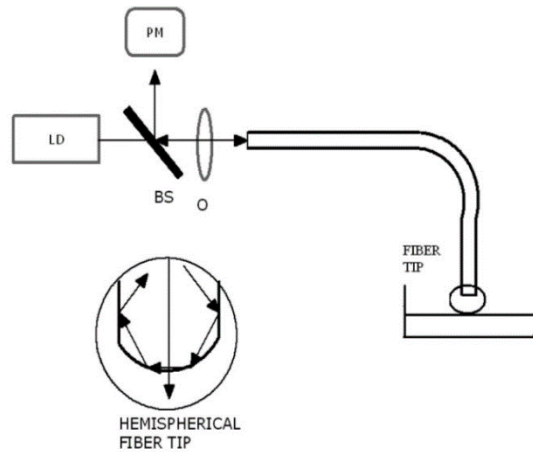


Figura 22. Arreglo experimental del sensor de nivel descrito^[7]

- Sensor de flujo: T. Nemoto et al^[8] presentan un sensor de flujo para medir velocidades de corriente oceánicas (figura 23). El principio de operación se basa en que un objeto cilíndrico (la fibra que atraviesa la tubería de flujo uniforme) provoca en el flujo perturbaciones llamadas vórtices de Karman, los cuales hacen vibrar a la fibra, generando en ella esfuerzos y deformaciones en los extremos donde está sujeta a la tubería, que produce a su vez variaciones de fase ópticas, las cuales son detectadas y medidas. Se usan fibras mantenedoras de polarización para minimizar los efectos dicho fenómeno.

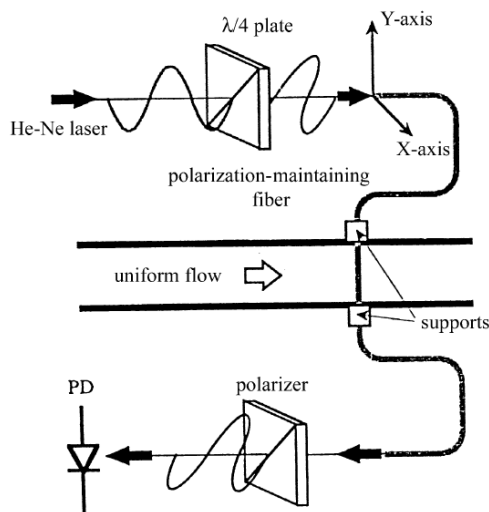


Figura 23. Arreglo experimental del sensor de flujo descrito^[8]

- Sensor de deformación y temperatura: L. Bo et al^[9] despliegan un sensor de fibra (figura 24) conteniendo dos redes de Bragg FBG1 y FBG2, y una red LPG (estos

tipos de redes se analizan más adelante). El conjunto de redes forman una cavidad resonante desde FBG1 hasta FBG2 en que si ingresa en dicho tramo una cierta longitud de onda diseñada, esta queda atrapada y es reflejada constantemente entre ambas redes de Bragg hasta que decae principalmente por efecto de transmisión de la red LPG, que cruza FBG2. Se emite un pulso de láser y se mide el tiempo en que ocurre el decaimiento exponencial de la señal, el cual teóricamente está relacionado con la transmitancia de la red LPG, la cual es en sí la red que realiza el sensado (las otras dos solo sirven para generar la cavidad). Cuando se presenta una variación de temperatura o deformación, la longitud de onda de resonancia cambia, por lo que midiendo el tiempo de decaimiento pueden obtenerse las mediciones.

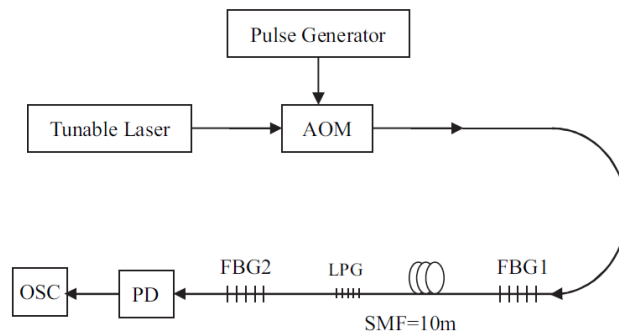


Figura 24. Arreglo experimental del sensor de deformación y temperatura descrito^[9]

- Sensor de voltaje AC: S. Kim et al^[10] describen el sensor de voltaje que desarrollan, en donde usan un sensor de fibra de tipo interferométrico. Un interferómetro de Michelson es producido mediante un arreglo de fibras ópticas, y se unen a un piezoeléctrico o PZT (figura 25, donde SMF son las siglas de fibra óptica monomodo). Cuando se aplica voltaje AC al piezoeléctrico, se genera una variación en la fase de la fibra interferométrica, lo cual cuantifica una medida.

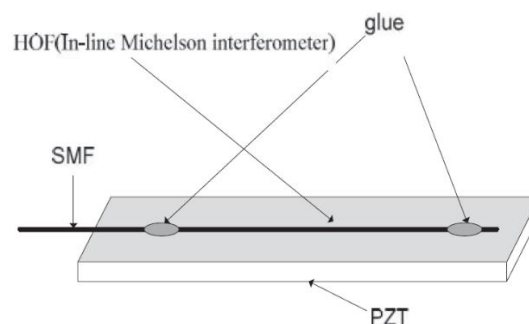


Figura 25. Arreglo experimental del sensor de voltaje AC descrito^[10]

2.3. Redes de Bragg

Las fibras con redes de Bragg son fabricadas removiendo el cladding de la fibra, y posteriormente aplicando luz de alta energía enfocada a lo largo del núcleo expuesto de manera periódica^[2], lo cual provoca variaciones del índice de refracción en dicho núcleo. A este proceso se le llama “grabar” o “imprimir” una red en la fibra. El efecto que se produce es que la red refleja de vuelta la luz con cierta longitud de onda, mientras que deja pasar sin atenuación al resto (figura 26). Esta longitud de onda dependerá de las propiedades de la fibra y del diseño de la red. La longitud entre cada punto de grabado es llamada período de la red, y puede ser tan pequeño como $0.5\mu\text{m}$ ^[1], mientras que la longitud total de la red suele ser del orden de fracciones de milímetros hasta algunos centímetros.

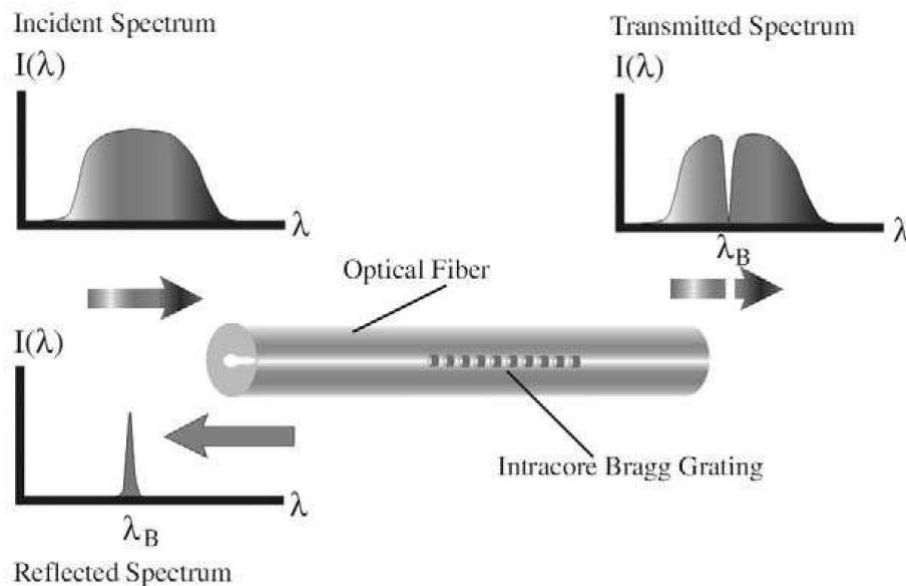


Figura 26. Fibra con red de Bragg grabada. Las muescas en la fibra son zonas donde se aplicó luz de alta energía^[1]

En la sección 1.4 se vio el fenómeno de acoplamiento para dos fibras. Sin embargo, existe otro tipo de acoplamiento que se presenta entre los modos de onda en la fibra^[1]. La red de Bragg, al poseer variaciones en el índice de refracción, provoca una reflexión de ciertos rayos de luz de vuelta hacia la fuente. La señal reflejada sintonizada a una longitud de onda específica se explica mediante una condición de resonancia^{[1][5]}, en donde la onda que se propaga en sentido normal, interfiere constructivamente con la onda que se propaga en sentido contrario, la cual está acoplada a partir de la onda de sentido normal (recibe energía de ella) gracias a la red de Bragg. El ancho de banda de longitud de onda que se refleja es extremadamente angosto, del orden de los nanómetros. Debido a este

comportamiento, es posible usarlo como sensor multiplexado, lo cual se verá en la sección 2.5.2.

Para explicar matemáticamente dicha reflexión y acoplamiento de modos, se parte de asumir una función para el índice de refracción^[1] (ver figura 27):

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos(2pz) \quad (2.1)$$

Donde se cumple que $p = \pi/\Lambda$

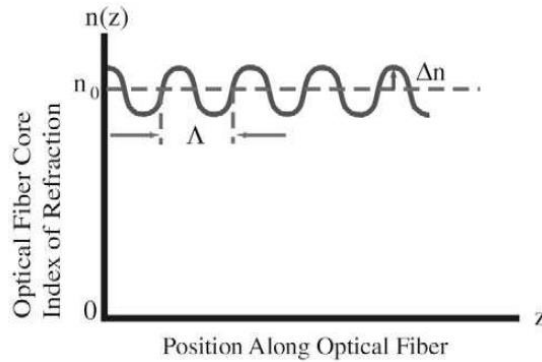


Figura 27. Variación del índice de refracción a lo largo de una red de Bragg^[1]

Suponiendo una solución para la variación del campo en z de la forma:

$$E(z, t) = E(z)e^{i\omega t} \quad (2.2)$$

Y reemplazándolo en la ecuación de onda 1.4, teniendo en cuenta 2.1, es posible llegar a la siguiente forma de solución^[1] para $E(z)$:

$$E(z) = a_f(z)e^{-ipz} + a_b(z)e^{ipz} \quad (2.3)$$

En donde el término de la izquierda de 2.3 representa la onda que se propaga en sentido normal y el segundo término la onda en sentido contrario. Se demuestra que las funciones $a_f(z)$ y $a_b(z)$ son funciones acopladas mediante un sistema de dos ecuaciones diferenciales lineales de primer orden^[1], lo cual explica el acoplamiento de los modos fundamentales en sentido normal y contrario. En la figura 28 se aprecian ambas funciones, donde L_G es la longitud total de la red.

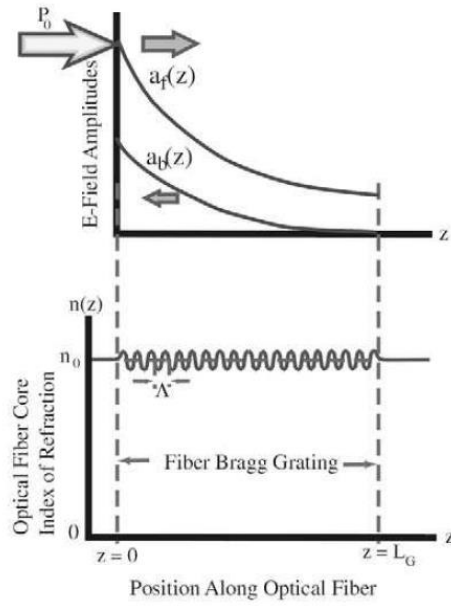


Figura 28. Funciones de amplitud de campo para la onda normal y contraria^[1]

La longitud de onda a la cual se presenta la resonancia es:

$$\lambda_B = 2n_0\Lambda \quad (2.4)$$

Finalmente, los valores de ancho de la banda angosta y de la máxima reflectividad (potencia reflejada/potencia emitida), pueden calcularse de la siguiente forma:

$$\Delta\lambda = \lambda_B \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{L_G}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2} \quad (2.5)$$

$$R_{m\acute{a}x} = \tanh^2 \left\{ \pi \left(\frac{\Delta n}{2n_0} \right) \left(\frac{L_G}{\Lambda} \right) \right\} \quad (2.6)$$

Por ejemplo, para $n_0 = 1.5$, $\Delta n = 0.0001$, $\Lambda = 0.517\mu m$, $L_G = 5mm$, entonces se tendrán valores $\lambda_B = 1550nm$, $\Delta\lambda = 0.17nm$, $R_{m\acute{a}x} = 58.8\%$. λ_B cae dentro de la segunda ventana descrita en la sección 1.1.3, figura 10.

Cuando ocurre una deformación axial en la fibra, la longitud de la red aumenta ligeramente, así como también el espaciamiento entre puntos grabados, es decir, se modifican Λ y L_G . Según 2.4 y 2.6, aquello produce una variación en λ_B y $R_{m\acute{a}x}$. Aquello es la base de toda medición de deformación en una fibra con red de Bragg^[11], ya que es posible calibrarse en laboratorio una gráfica de deformación versus λ_B .

2.4. Redes LPG

Una red LPG es similar a una red de Bragg. Son fabricadas de forma análoga, pero con la diferencia que la red LPG posee los puntos de grabado con un espaciado o período del orden de los cientos de μm , en contraste con las $0.5\mu\text{m}$ de período que puede tener una FBG^[1]. Debido a ello, obtener fibras LPG resulta más económico, ya que no es necesario que los equipos alcancen precisiones del orden de los nanómetros, como sí ocurre en la fabricación de las redes de Bragg. De igual forma a las FBG, en las redes LPG el grabado modifica el índice de refracción, provocando una atenuación en su espectro de transmitancia (que se verá en la sección 2.4.2), brindándole propiedades de sensor.

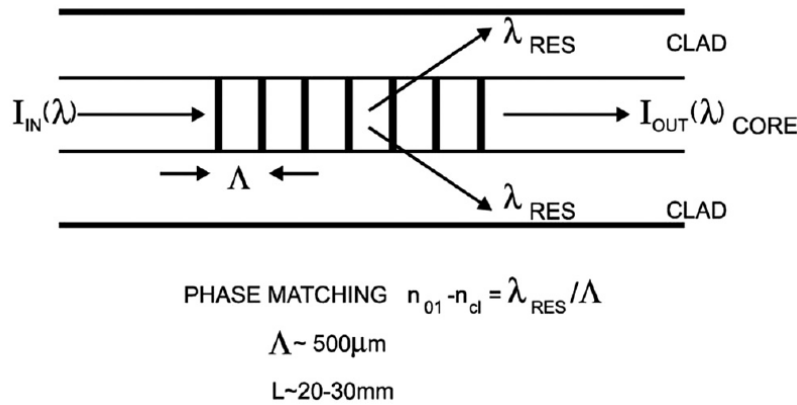


Figura 29. Fibra LPG y su principio de funcionamiento^[5]

En las fibras LPG, a diferencia de las FBG, se presenta un acoplamiento de modos en la misma dirección, uno de ellos es el fundamental, y el otro modo es azimutalmente simétrico (LP_{0m} con $m > 1$ en la figura 8), y se transmite a través del cladding, es por ello que no llega a detectarse en el receptor, haciendo que se produzca una atenuación para la longitud de onda correspondiente y las cercanas a ella^[5]. En la figura 29 se tiene una fibra LPG y se representa el funcionamiento descrito de acoplamiento con modos de transmisión en el cladding.

2.4.1. Técnicas de fabricación de sensores basados en redes LPG

Dentro de las primeras aplicaciones experimentales para la fabricación de redes de Bragg, se usó luz UV para realizar los puntos de quemadura espaciados a lo largo de la fibra. Posteriormente se fueron utilizando otras fuentes como los láseres de alta energía, láseres CO₂, e incluso mediante tratamientos micromecánicos^[1]. El presente estudio se enfoca en

las redes LPG grabadas mediante la aplicación de láser CO₂, que es el equipo disponible en laboratorio.

En el proceso de grabado de fibras LPG, se aplica un láser de CO₂ enfocado mediante una lente^[15] de forma periódica a una fibra tensionada. El núcleo de la fibra se funde temporalmente y queda ligeramente deformado, impactando en el índice de refracción. Si se expone el láser desde un solo lado y la potencia del láser no es la correcta, el punto de grabado no será completamente simétrico^[15], por lo que debe encontrarse la potencia adecuada, normalmente de forma empírica. Este proceso de grabado de fibras usando láser CO₂ es presentado en la figura 30.

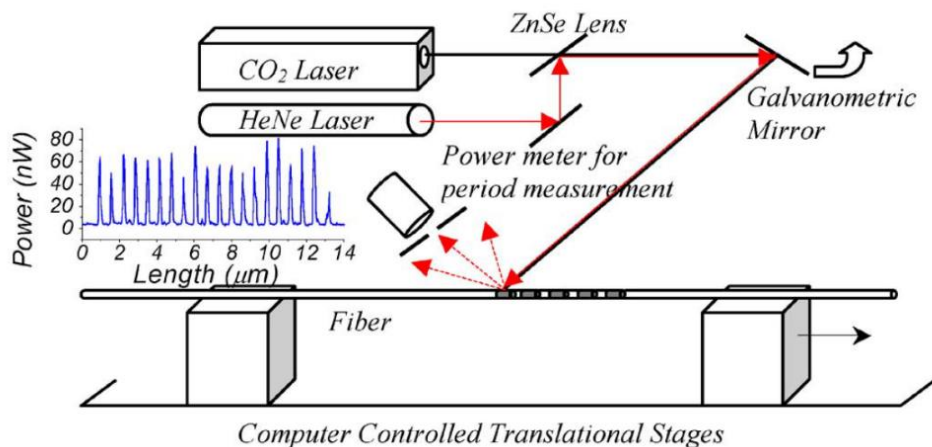


Figura 30. Proceso de fabricación de fibras ópticas tipo LPG usando láser CO₂.

2.4.2. Transmitancia de luz de fibras LPG

Normalmente, si no hubiera una red grabada en la fibra, solo se tendría el espectro de atenuación natural de las fibras, tal como se vio en la sección 1.1.3. Sin embargo, con la red LPG grabada se obtienen varios picos (figura 31) en el espectro de transmitancia.

Una diferencia que puede apreciarse con respecto a las redes FBG, es que en las LPG no se produce un solo pico de atenuación, sino que se producen varios. Estos picos se corresponden cada uno con los diferentes modos de ondas LP_{02} , LP_{03} , LP_{04} , etc., los cuales están acoplados con el modo fundamental LP_{01} en la misma dirección, pero viajando a través del cladding^[1]. Para calcular las longitudes de onda en que aparecen los picos, se parte de una condición de emparejamiento de fases, donde la diferencia de las constantes de

propagación de los modos fundamental y de cladding es igual al número de onda de la función sinusoidal del índice de refracción:

$$\beta_{01} - \beta_{0m} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.7)$$

Donde β_{01} y β_{0m} son las constantes de propagación del modo fundamental y cladding de orden m , respectivamente.

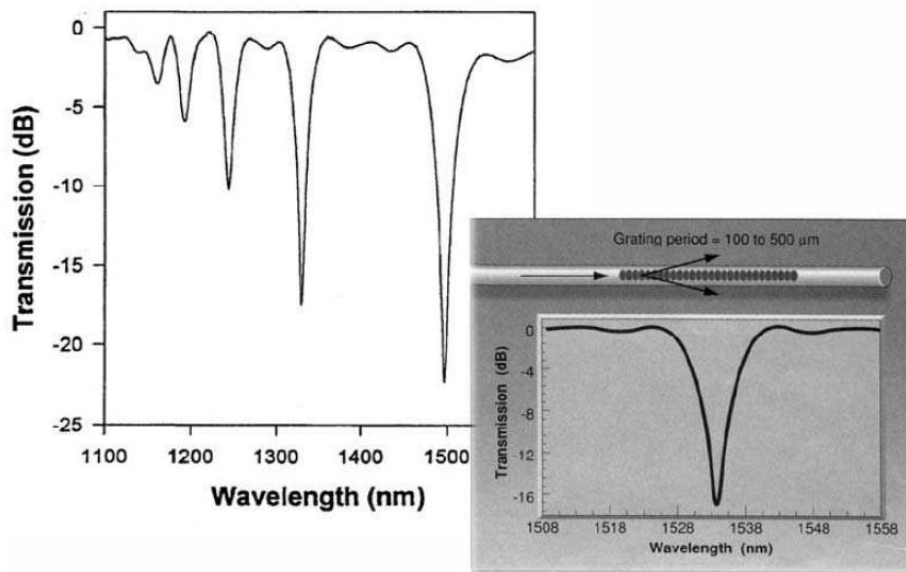


Figura 31. Espectro de transmitancia para una red LPG

Los valores de las constantes de propagación β se calculan a partir de las características de la fibra, mediante la ecuación trascendental 1.9 (puede solucionarse mediante métodos numéricos). Luego, haciendo:

$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad (2.8)$$

Y reemplazando 2.8 en 2.7, se obtienen las longitudes de onda a las cuales se presentan los picos en la gráfica de transmitancia^[14]:

$$\lambda_m = (n_{01} - n_{0m})\Lambda \quad (2.9)$$

Donde:

λ_m : frecuencia centrada en el pico de atenuación en que la luz está acoplada al modo de onda del cladding de orden m

n_{01} : índice efectivo de refracción del modo fundamental

n_{0m} : índice de refracción del modo de onda de cladding de orden m

Λ : período de la red

La transmitancia para la longitud de onda correspondiente al modo de cladding m , y el ancho de banda de longitud de onda para dicho modo, pueden calcularse como^[14]:

$$T_m = 1 - \frac{\sin^2 \left[\kappa_g L \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\kappa_g} \right)^2} \right]}{1 + \left(\frac{\delta}{\kappa_g} \right)^2} \quad (2.10)$$

$$\Delta\lambda_m = \frac{0.8\lambda^2}{L(n_{01} - n_{0m})} \quad (2.11)$$

Donde κ_g es una constante de acoplamiento^[14] que puede obtenerse desarrollando las ecuaciones diferenciales de modo similar a como se indicó en la sección 2.3, depende de los índices de refracción, la longitud de onda, y el período de la red. El valor de δ se define:

$$\delta = \frac{1}{2} \left\{ \beta_{01} - \beta_{0m} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right\} \quad (2.12)$$

En contraste con las fibras FBG, en las redes LPG, el pico de atenuación posee un ancho de banda más grande. Ello ocurre porque la fibra tiene una menor cantidad de perturbaciones o interacciones de rayos en la red. Una analogía para ello es considerar la transformada de Fourier de una función sinusoidal finita^[5], que es el modelo de la función del índice de refracción de la red visto en la ecuación 2.1. Cuando la función tiene un período más largo, la gráfica de la transformada de ensancha.

2.4.3. Medición de deformación con fibras tipo LPG

De las ecuaciones 2.9-2.11, puede concluirse que las frecuencias a las cuales se presentan los picos de atenuación, y el valor de la transmitancia, dependen básicamente del período de la red Λ , ya que el resto de variables dependen de los parámetros de fabricación de la fibra y la red LPG. De manera similar al procedimiento para las fibras de Bragg, en el caso de las LPG, cuando se aplica una deformación en la fibra, el período de la red crece, y se presentará un desplazamiento espectral cuya magnitud depende de qué tanto se haya deformado la fibra, de acuerdo con la ecuación 2.9. De hecho, dicha ecuación es lineal, por lo que la calibración del sensor resulta sencilla a lo largo de un rango de medición.

No obstante, es importante mencionar que las redes LPG son susceptibles a la temperatura, presentando un corrimiento espectral al ser aumentada o disminuida, lo cual puede ser una ventaja como aplicación de sensores térmicos, pero por otro lado, en las aplicaciones de deformación, las variaciones bruscas de temperatura en el ambiente podrían alterar la medición si no se toman en cuenta. En la figura 32 se muestra la dependencia de la desviación de longitud de onda con respecto a cambios de temperatura.

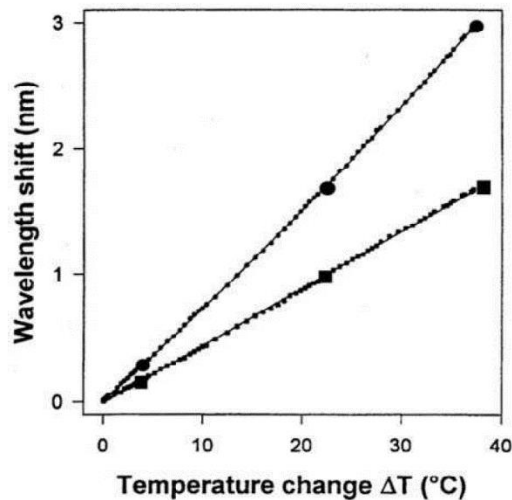


Figura 32. Gráfica de corrimiento de longitud de onda versus variación de temperatura en fibras LPG

2.5. Monitoreo de estructuras

El análisis de esfuerzo y monitoreo de estructuras permite prevenir fallas catastróficas que puedan ocurrir en estas ocasionando pérdidas económicas o humanas. Tradicionalmente, se aplican en las estructuras cronogramas de mantenimiento con inspecciones visuales que no son tan precisas, y se suelen usar también costosos sistemas de

acelerómetros. No obstante, los sensores de fibra han emergido como la solución más eficiente cuando se trata de monitoreo de estructuras, sobre todo a las de gran envergadura, haciéndolas más seguras y durables. Los estudios más modernos de monitoreo de estructuras utilizando tecnología de fibra óptica aplican conocimientos de inteligencia artificial, materiales composite y otros^[7].

El monitoreo de estructuras con fibras pueden ser aplicados a edificios, puentes, oleoductos, represas, entre otros^[3]. La red de fibras suele adjuntarse en el interior de las estructuras o en las superficies de estas, y forman parte de un sistema como el visto en las figuras 20-21. La información obtenida por los sensores puede ser monitoreada en tiempo real o de forma periódica, y es usada para programar actividades de mantenimiento focalizadas, aumentar la seguridad de la construcción, así como también para mejorar diseños futuros de edificaciones. Lo que se mide en las estructuras suelen ser parámetros mecánicos (esfuerzo, deformación, vibración), físicos (temperatura, humedad) y químicos (pH, oxidación)^[3]. Las mediciones pueden ser realizadas a lo largo de toda la estructura o de manera focalizada en partes relevantes. El objetivo principal del sistema es el de detectar, localizar y cuantificar un problema en la edificación, de modo que se tomen las medidas preventivas y correctivas necesarias para su mantenimiento. Para ello, en el procesamiento de las señales se implementan diversos algoritmos, que pueden ser tan simples como una comparación contra un valor límite, o más avanzados como un análisis estadístico^[3].

2.5.1. Montaje de sensores estructurales

Para asegurar que un sistema de sensores de monitoreo estructural brinde los datos correctos, así como también tenga largo tiempo de vida, debe realizarse un montaje de las fibras en forma adecuada. La fibra óptica puede instalarse en el interior o en la superficie de la estructura, y puede montarse sin problemas en materiales de concreto, metales o plásticos.

Durante el montaje es necesario tener en consideración que la fibra no debería curvarse más allá de un radio de $3\text{cm}^{[1]}$, ya que ello ocasionaría pérdidas en la señal, tal como se vio en el capítulo 1. Los conectores y puertos de conexión deben ser limpiados con etanol siempre que se tengas que desconectar y reconectar. Para lograr mejores niveles de sensibilidad, la unión entre la superficie y la fibra debe ser lo suficientemente rígida, ya que el esfuerzo de la estructura debe ser transmitida sin variaciones hacia el sensor de fibra, por

tanto, la superficie de contacto debe ser limpiada cuidadosamente de toda impureza como polvo o grasas. Para el caso de unión con metales, puede adherirse la fibra de forma directa mediante un pegamento epóxico, mientras que para el caso de concreto en una edificación, se recomienda usar una cinta protectora entre el concreto y la fibra, ya que la alta alcalinidad del concreto puede degradar fibras desprotegidas^[1]. En la figura 33 se visualiza el montaje sobre una columna de concreto, en donde las siglas FBG significan Fiber Bragg Grating o Redes de Bragg, lo cual será visto en la sección 2.4.

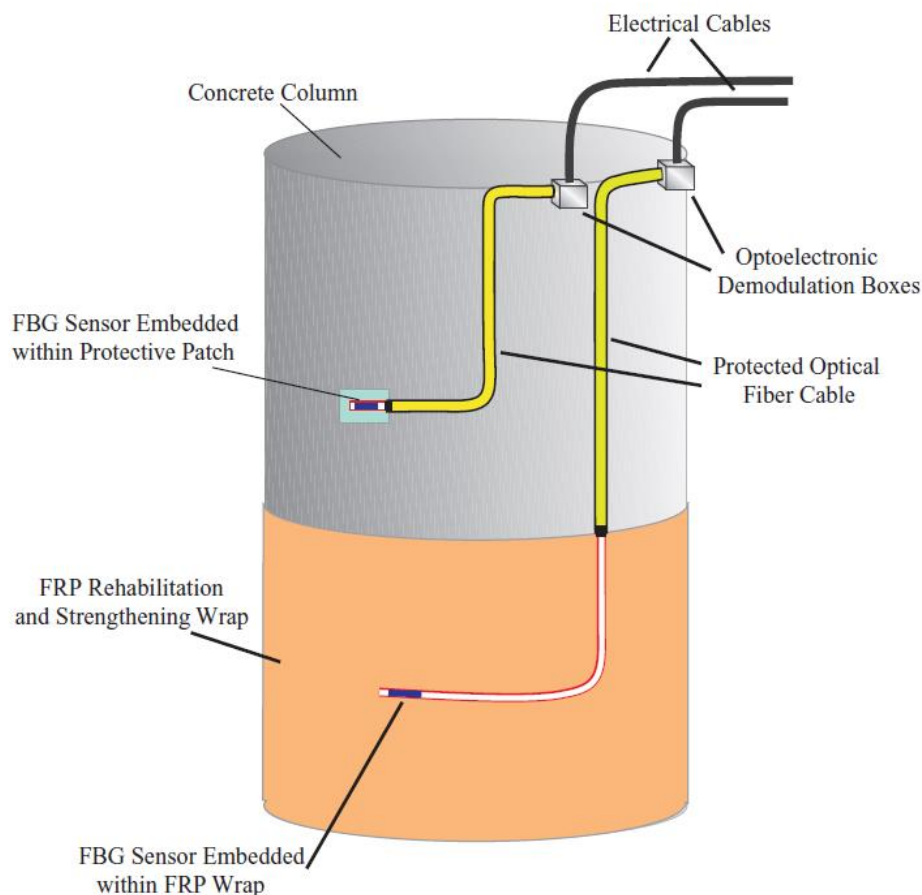


Figura 33. Montaje de fibras sobre estructuras de concreto^[1]

2.5.2. Sensores multiplexados y distribuidos

En el monitoreo de estructuras se requiere realizar mediciones en diversos puntos. Con la finalidad de no tener que disponer de múltiples fuentes de luz y analizadores espectrales por cada punto de medición, es posible realizar lo que se denomina multiplexación en frecuencia. En cada punto donde desea monitorearse una variable (temperatura, deformación, etc.) se tiene un sensor de fibra, y todos los sensores están

conectados a la misma fuente de luz. Cada sensor se diseña para operar a distintas frecuencias, de esta manera, es posible combinar en un solo circuito de fibras diversos canales de información, uno para cada sensor. Es posible emplear las redes LPG, aunque usualmente, se emplean las redes de Bragg, ya que, al tener tan angosto ancho de banda de longitud de onda, permite que a lo largo de toda la ventana espectral puedan incluirse múltiples frecuencias de resonancia. En otras palabras, a lo largo de un solo tendido de fibra, podrían grabarse una gran cantidad de redes FBG, y con una sola fuente de luz y receptor, sería posible monitorear en tiempo real la deformación en diversos puntos de una estructura.

La multiplexación puede implementarse en serie (redes grabadas una a continuación de otra en la misma fibra) o en paralelo, como la mostrada en la figura 34.

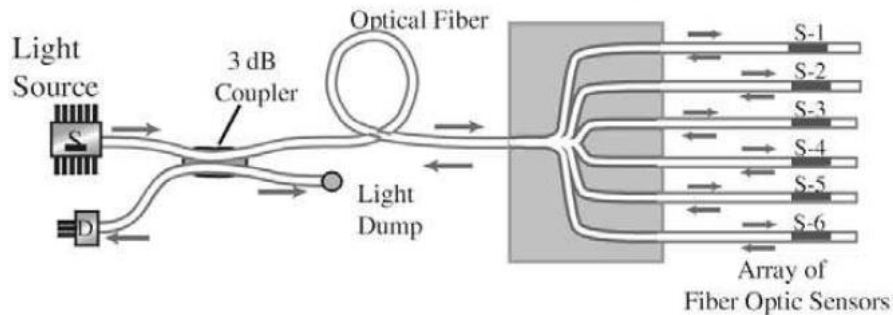


Figura 34. Multiplexación en frecuencia de sensores de fibra^[1]

En caso se quisieran aplicar fibras LPG para el monitoreo de estructuras, una opción es la de colocar múltiples fibras LPG en paralelo, pero sin conectarlas a un mismo punto, sino que mantenerlas independientes. En dicho caso no podría realizarse un monitoreo en tiempo real de forma continua, pero sí puede monitorearse de manera intermitente, es decir, cada cierta cantidad de días o semanas.

Capítulo 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL PARA FABRICACIÓN AUTOMATIZADA DE REDES LPG

3.1. Diseño e implementación del sistema

3.1.1. Diagrama de bloques

Existen actualmente sistemas similares investigados e implementados que sirven como base para la realización del sistema^[15]. La figura 35 presenta el diagrama de bloques a implementar. La alimentación de los equipos requiere ser protegida ante picos de corriente para evitar daños. Por otro lado, desde la PC se comunica y se dan comandos a los equipos que controlan al láser y a los motores a pasos.

El controlador de láser permite regular la potencia, y definir el momento exacto de laseo. El láser produce el haz requerido para el quemado de la fibra, pasando previamente por una lente que lo concentre en un pequeño punto, que incidirá sobre la fibra óptica. El controlador de motor a pasos vertical está conformado por el Arduino y el controlador TB6560, y permite mover el motor a pasos que produce movimiento vertical con ayuda de un sistema mecánico con engranajes en donde se ubica el soporte y se tensan las fibras. Dicho movimiento es requerido para que se asegure un laseo transversal uniforme en la fibra. Por otro lado, el controlador de la base horizontal regula con precisión la posición en que realizará el laseo, de tal modo que se obtenga una red uniformemente espaciada de puntos. Dado que en el manual del láser se sugiere como buena práctica colocar como mínimo ventilación para el láser, esto se realizará mediante pequeños coolers.

Es necesario resaltar que el diseño mecánico del soporte y tensado también influirá en los parámetros obtenidos en la red^[15], ya que la fibra óptica debe encontrarse tensa para evitar irregularidades, esto es tomado en cuenta al momento de hacer el diseño mecánico.

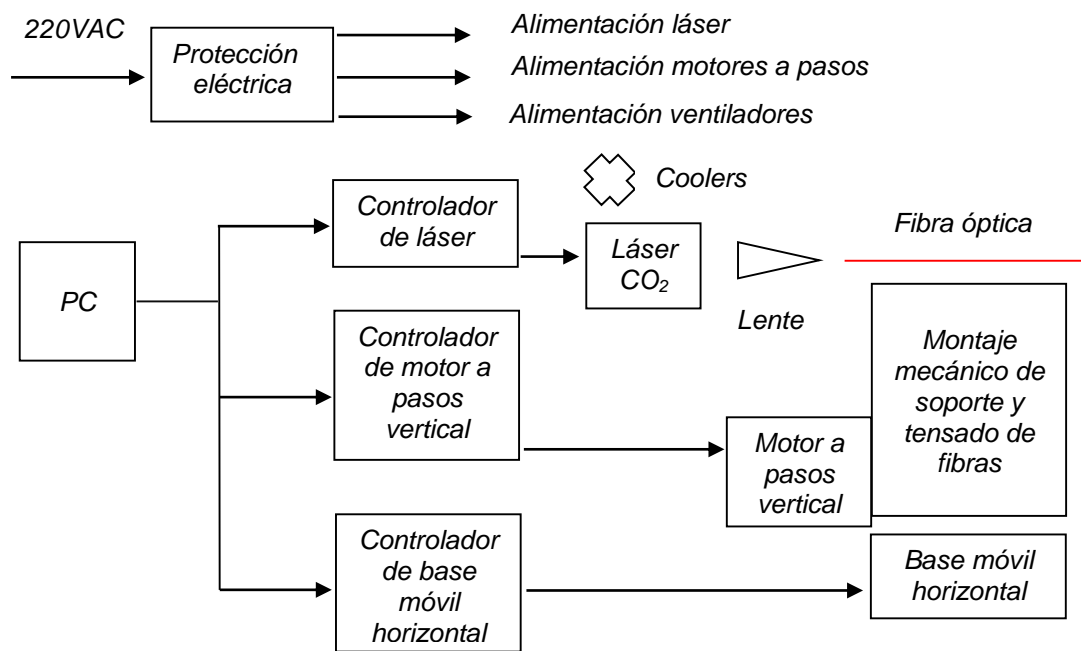


Figura 35. Diagrama de bloques del sistema

3.1.2. Diseño mecánico

En la figura 36 se presenta el diseño mecánico general del sistema, el cual consta de las partes indicadas en el diagrama de bloques presentado en la parte anterior. La base móvil horizontal cuenta con un motor de pasos, el cual realiza el movimiento. En el soporte donde se colocan las fibras (figura 37) se instala también un motor de pasos para aplicar movimiento vertical con ayuda de engranajes. Los pequeños cilindros oscuros en la imagen están fijos al soporte y sirven para tensar la fibra con ayuda de pesas, de modo que no haya un corrimiento de la fibra por el movimiento, con lo que se obtendrá un grabado láser más uniforme.

3.1.3. Diseño eléctrico

La alimentación proviene de un estabilizador de voltaje de 220VAC, el cual, antes de alimentar los equipos de nuestro sistema, debe pasar por una protección eléctrica (figura 38) que contendrá un interruptor termomagnético, que se calcula a partir de la información brindada en los manuales de los equipos. La siguiente tabla muestra las potencias y corrientes consumidas:

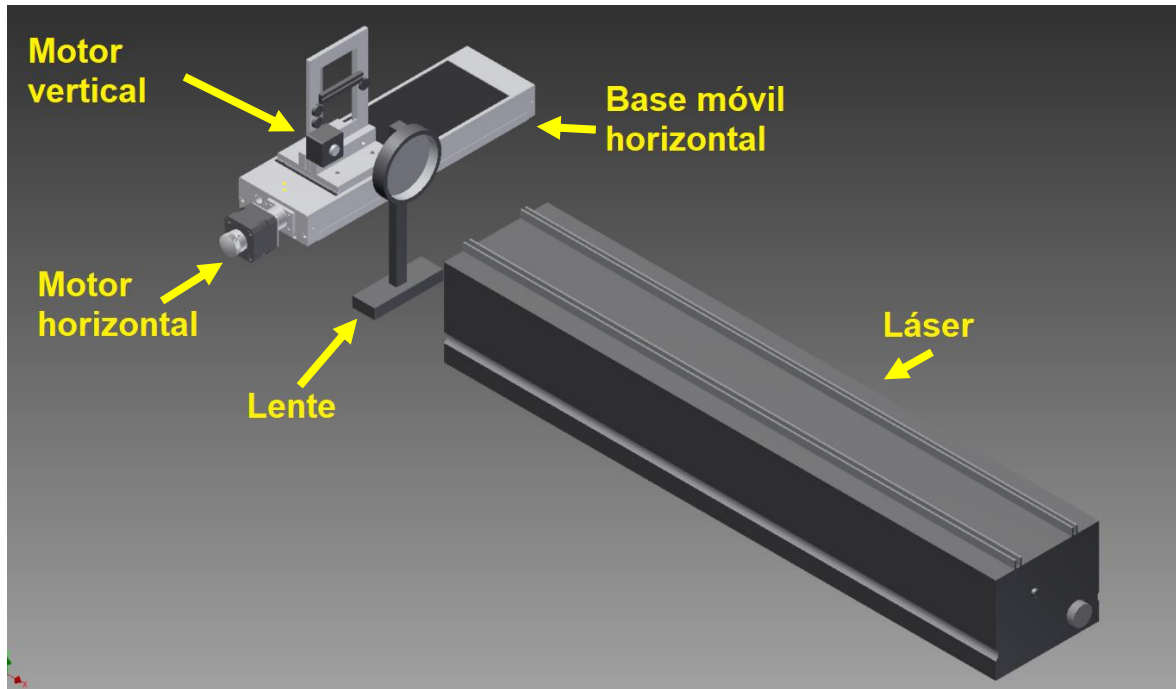


Figura 36. Diseño mecánico general

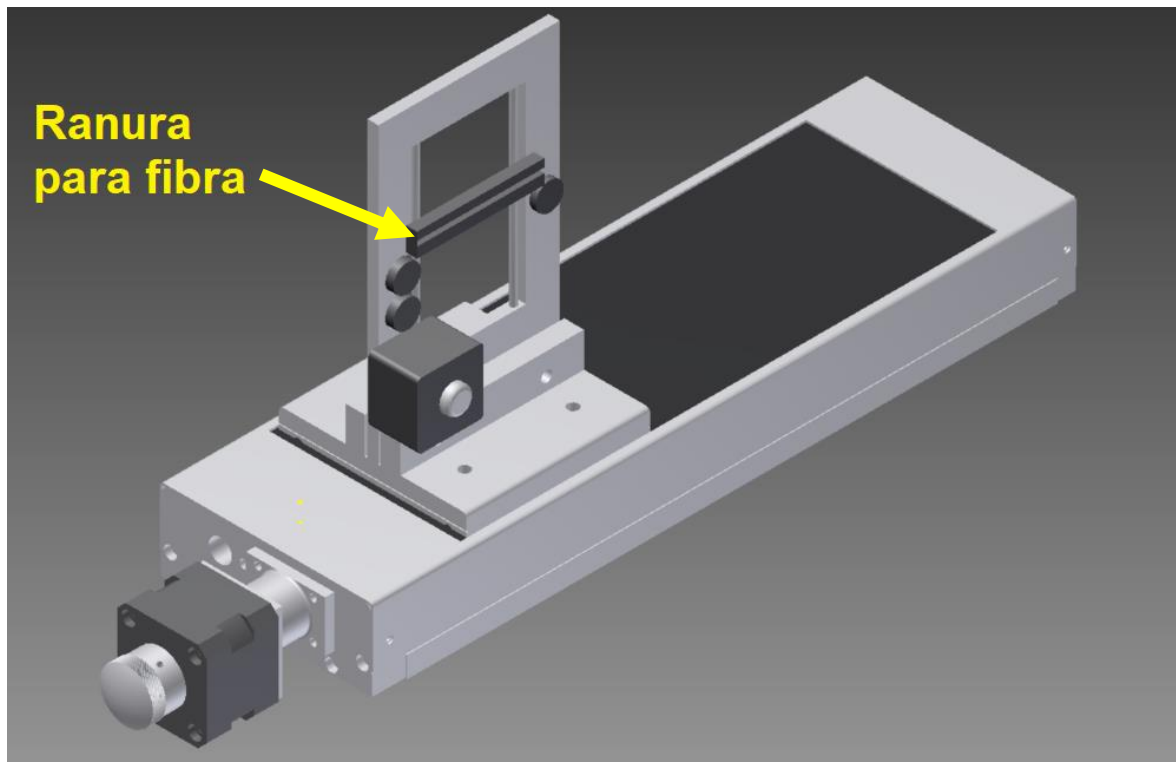


Figura 37. Diseño mecánico de base horizontal y soporte de fibras

| EQUIPO | POTENCIA PICO MÁXIMA A 220VAC | CORRIENTE AC |
|--|-------------------------------|--------------|
| Láser | 30W | 0.14A |
| Controlador y motor de movimiento horizontal | 25W | 0.11A |
| Controlador y motor de movimiento vertical | 20W | 0.09A |
| Ventiladores | 2W | 0.01A |

Entre todos los equipos suman una corriente pico total de 0.35A en el lado de 220VAC, por lo tanto, se usará el interruptor mínimo comercial que se halla en las tiendas de ferretería, que es de 10A. También se instaló un switch de pared con piloto para seguridad, ya que el láser no cuenta con un interruptor de encendido. Finalmente el voltaje es enviado a las tomas de corriente para los equipos.

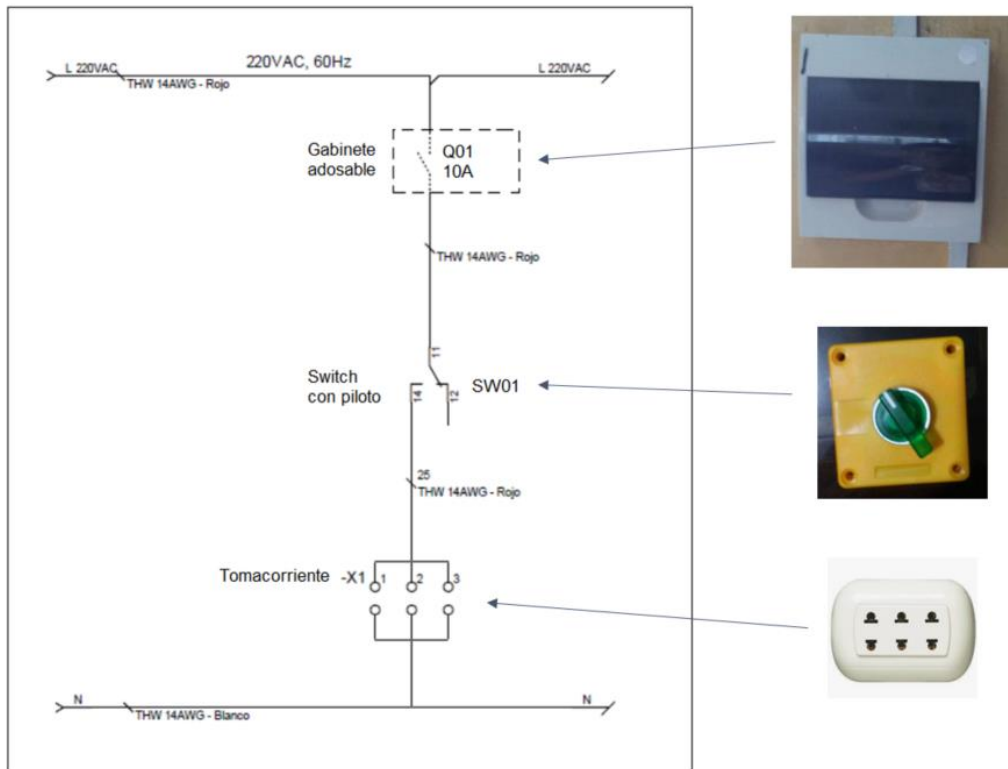


Figura 38. Esquema eléctrico de la protección implementada

3.1.4. Equipo y software utilizados

Los dispositivos principales utilizados en el desarrollo del sistema se encuentran en el Laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI. Los equipos son los siguientes:

- Láser CO₂ Synrad 48-1KM: (figura 39) es una parte principal del sistema, ya que permite realizar el quemado de la fibra óptica para lograr obtener la red grabada en ella. Posee una potencia máxima de 30W, distancia máxima de 1m donde el láser posee perfil cuadrado, y adicionalmente cuenta con elementos de seguridad. Emite un haz de radiación electromagnética infrarrojo con longitud de onda de entre 10200-10800 nm. Su funcionamiento se basa en una cavidad óptica resonante que posee un gas de CO₂, al que se aplica una descarga eléctrica y con ayuda de espejos se logra emitir el haz. Para el control del láser, se usa su equipo de comunicación UC2000, el cual permite comunicación serial con el computador.



Figura 39. Láser de CO₂

- Base móvil horizontal Thorlabs NRT100m: (figura 40) es una base de trabajo que se moviliza horizontalmente y que puede moverse en pasos de hasta el orden de los micrómetros. Para ello cuenta con un motor a pasos acoplado, de paso muy fino, que permite realizar los movimientos de precisión requeridos. Para manipular esta base, es necesario un controlador de motor, se utilizará el Thorlabs BSC201. Esta base será usada

para movilizar las fibras ópticas de manera horizontal, de modo que el láser incida sobre ellas cada cierto período de longitud, del orden de las 500 micras.



Figura 40. Base móvil horizontal

- Controlador de motor a pasos Thorlabs BSC201: (figura 41) este equipo controla al motor a pasos que se encuentra acoplado a la base móvil horizontal. Es un equipo bastante robusto, y cuenta con software especializado que facilita considerablemente el control del motor a pasos desde la PC. Posee un solo canal (solo puede controlar un motor), y permite controlar parámetros como velocidad del motor, aceleración, amplitud del paso, entre otros.



Figura 41. Controlador de motor a pasos de movimiento horizontal

- Motor a pasos 17PM-J034-P2VS: (figura 42) motor al que se acoplará el sistema mecánico de desplazamiento que permita el movimiento vertical del soporte de las fibras.



Figura 42. Motor a pasos para movimiento vertical

- Controlador de motor a pasos TB6560: (figura 43) dado que el controlador BSC201 solo posee un canal de salida, y se requiere para el sistema adicionalmente movimiento vertical, se implementará este controlador que permita manipular el motor a pasos descrito en el punto anterior. Este controlador es de bajo costo, puede manejar corrientes de hasta 3A, con voltajes de hasta 24V, y es compacto.

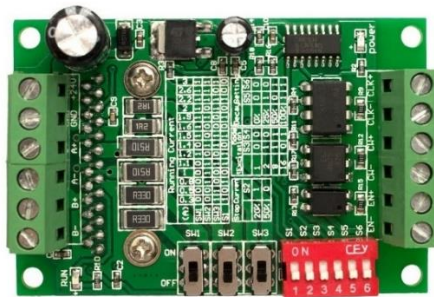


Figura 43. Controlador de motor a pasos de movimiento horizontal

- Arduino Nano: placa con microcontrolador ATmega328P (figura 44), permite realizar una amplia gama de tareas. Es ampliamente usado debido a su bajo costo y facilidad de uso mediante librerías y programación en lenguaje C. Aquí se aplicará como un medio de comunicación entre la PC y el controlador de motor a pasos DRV8825 del motor de movimiento vertical.

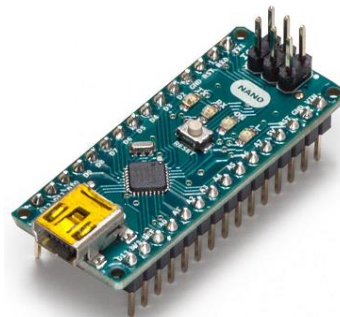


Figura 44. Placa Arduino Nano

- Ventilación: según el manual del láser, si este estuviera funcionando con altos valores de porcentaje de potencia, entonces requeriría disipación de calor mediante agua. Sin embargo, dado que solo se trabajará con potencias de hasta 10% de la potencia máxima, entonces solo será necesario aplicar ventilación por aire. Esto se realiza mediante cuatro coolers de computadora dispuestos a los lados laterales del láser, fijados en bases metálicas. Dichos coolers son alimentados con 12VDC (figura 45).



Figura 45. Coolers para ventilación forzada de láser

- Herramientas de software: Con el fin de desarrollar los programas que permitan realizar el diseño y manejar los equipos, se hizo uso del siguiente software:
 - LabView: es un entorno de desarrollo completo el cual abarca tanto interfaz gráfica como programación. Con este se realiza la interfaz en donde se introducirán los parámetros de la red LPG a grabar, además de programar la comunicación por protocolo serial con los equipos y la lógica secuencial de control.
 - AutoCAD: software de diseño para la realización de planos eléctricos y esquemáticos necesarios para la documentación del sistema
 - Inventor: software 3D para el diseño de los equipamientos mecánicos requeridos
 - Arduino IDE: entorno de programación en lenguaje C para la comunicación con el microcontrolador y control del motor a pasos de movimiento vertical de fibras
 - Thorlabs APT Config: software de configuración del driver de motor a pasos usado para la base motorizada usada para el movimiento horizontal de las fibras

3.2. Automatización del proceso de fabricación de redes LPG

3.2.1. Programa principal

El programa de lógica de control del sistema se encuentra implementado en LabView (anexo A), en donde se desarrolló una interfaz gráfica que abarque el proceso de fabricación de grabado de redes (figura 46).

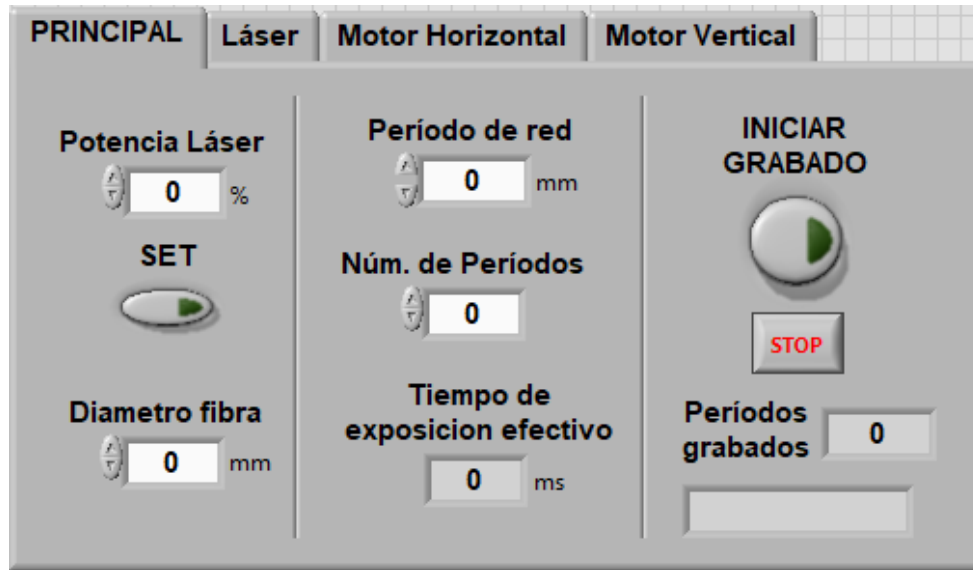


Figura 46. Interfaz principal para grabado de redes en fibra

Como puede verse, se podrán modificar en esta pantalla los principales parámetros del grabado de fibras: potencia del láser, período de la red, número de períodos y tiempo de exposición. Al presionar el botón de iniciar grabado, se iniciará la secuencia de funcionamiento, que tiene el siguiente algoritmo:

- Quemado de un punto en la fibra óptica mediante el láser durante el tiempo de exposición, mientras que simultáneamente se mueve la fibra de manera vertical, para asegurar que el láser no queme solo una pequeña fracción de la fibra.
- Retorno a su posición inicial del motor vertical
- Movimiento horizontal de la fibra, según el período de la red configurado.
- Repetición de los pasos anteriores tantas veces como se haya configurado el número de períodos.

Al finalizar la secuencia, se obtendrá entonces una secuencia de puntos quemados, espaciados uniformemente. Al modificar los parámetros de potencia, tiempo de laseo y número de períodos, cambiará el comportamiento de la red LPG grabada. Parte de la experimentación consiste en realizar múltiples pruebas con diferentes parámetros hasta encontrar aquellos que permitan obtener una red sin irregularidades.

3.2.2. Manejo de láser CO2

En la figura 47 se muestra la interfaz de control del láser. Primero, el controlador del láser debe configurarse para recibir datos por su puerto serial. Luego, en la interfaz debe indicarse el puerto USB, así como la potencia del láser. Con el botón SET se establecerá este parámetro. El diámetro de láser enfocado se obtendrá mediante microscopía al tener el sistema en su posición final, luego de haber realizado pruebas y obtenido la posición de la lente que permita obtener fibras uniformes. Finalmente, con el pulsador TEST LÁSER se ejecutará un laseo durante el tiempo configurado. El indicador ESTADO LÁSER lee en todo momento si el láser se encuentra encendido o apagado.



Figura 47. Interfaz gráfica para control de láser CO2

El programa (anexo A.2) se basa en abrir una comunicación serial con el controlador del láser, para luego monitorear el estado de los botones. En caso se presione alguno, se envía el comando hexadecimal especificado en el manual del controlador UM2000 del láser.

3.2.3. Control de base móvil para movimiento horizontal de fibras

De modo similar al caso del láser, en la interfaz del motor horizontal (figura 48) pueden configurarse los parámetros para el movimiento de este, y se tiene también un indicador de su posición actual. Al presionar el botón de TEST, se ejecuta un movimiento horizontal de amplitud configurada en la ranura “Período de movimiento test”.

La lógica del programa (anexo A.3) se implementa gracias a subrutinas que se encuentran en librerías que el LabView adquiere al instalar el software de configuración del controlador de motor a pasos.

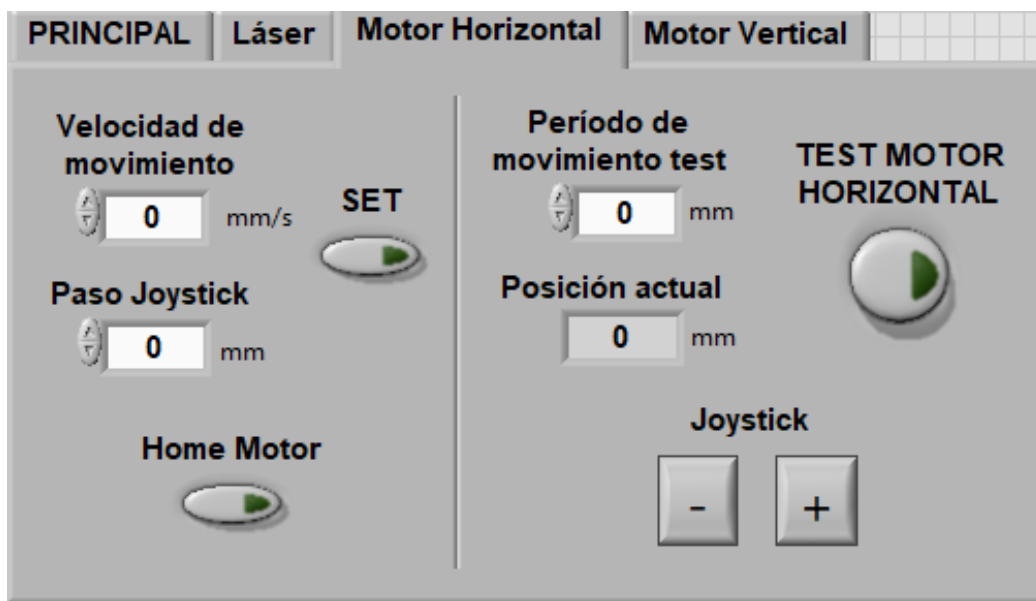


Figura 48. Interfaz gráfica para control motor de movimiento horizontal

3.2.4. Control de motor a pasos para movimiento vertical de fibras

Las configuraciones de este motor: velocidad de movimiento, amplitud de movimiento vertical, paso de joystick aún dependerán del desarrollo mecánico acoplado, ya que como aún no se tiene implementado, no es posible saber a cuánto de desplazamiento en mm equivale cada paso del motor. No obstante, ya se tiene implementada la lógica de control en LabView (figura 49) y en Arduino para realizar el movimiento del motor a pasos.

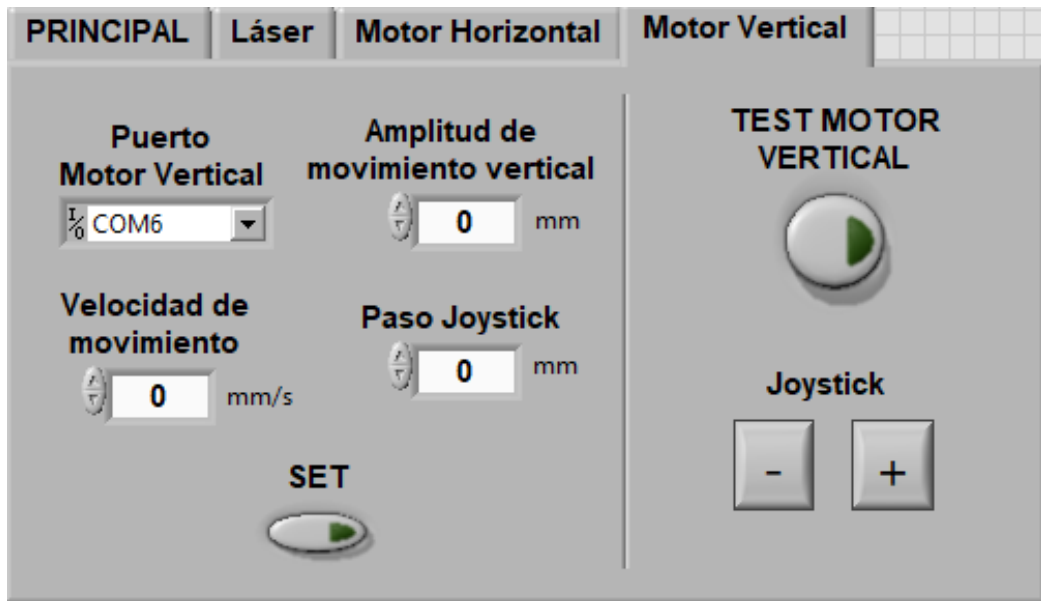


Figura 49. Interfaz gráfica para control motor de movimiento horizontal

Capítulo 4

RESULTADOS Y APLICACIONES

4.1. Puesta en marcha del sistema

4.1.1. Pruebas de equipos por separado

Se obtuvieron resultados satisfactorios en las pruebas de control del láser mediante la computadora (figura 50 y 51). Al configurar y comandar desde la interfaz una potencia de 5.0% y tiempo de laseo de 1 segundo, este se efectuó de manera correcta, teniéndose como un indicador un puntero visible del mismo equipo láser. El equipo de comunicación UC-2000 indica que la potencia es la correcta, y que se está usando el puerto serial RS232 para controlar el encendido y apagado del láser.



Figura 50. Pruebas de funcionamiento de láser



Figura 51. Prueba de funcionamiento de controlador de láser

Las pruebas de funcionamiento de la base horizontal también fueron exitosas (figura 52), obteniéndose movimientos horizontales del orden de las micras (0.01mm), para el sistema se requieren espaciamentos del período de la red de unas 500 micras (0.5mm), con lo cual lo obtenido es suficiente para la presente aplicación. La base NRT100 es muy precisa, ya que cuenta con un preciso control de micro-steps para el motor de pasos, con una precisión de hasta 100nm, lográndose una performance de torque y dinámica muy estables, lo cual es observado claramente durante las pruebas llevadas a cabo. Para evitar generar algún desplazamiento indeseado sobre la fibra, incluso es posible configurar la aceleración y velocidad del motor para que sea aún más pequeña, y así lograr movimientos más finos y lentos.



Figura 52. Pruebas de funcionamiento de base móvil horizontal

En el caso de las pruebas del motor de pasos de movimiento vertical, se logró una correcta comunicación y control desde la PC hacia el Arduino (figura 53). El motor a pasos realiza los movimientos comandados desde la interfaz en Labview, y responde adecuadamente a las configuraciones de velocidad y longitudes de movimiento. Dado que el movimiento vertical sirve únicamente para hacer que la fibra sea quemada transversalmente, no es necesaria tanta precisión como en el caso del motor horizontal, ya que solo basta que se tenga una velocidad constante en durante el movimiento, lo cual es asegurado por el control del motor a pasos.

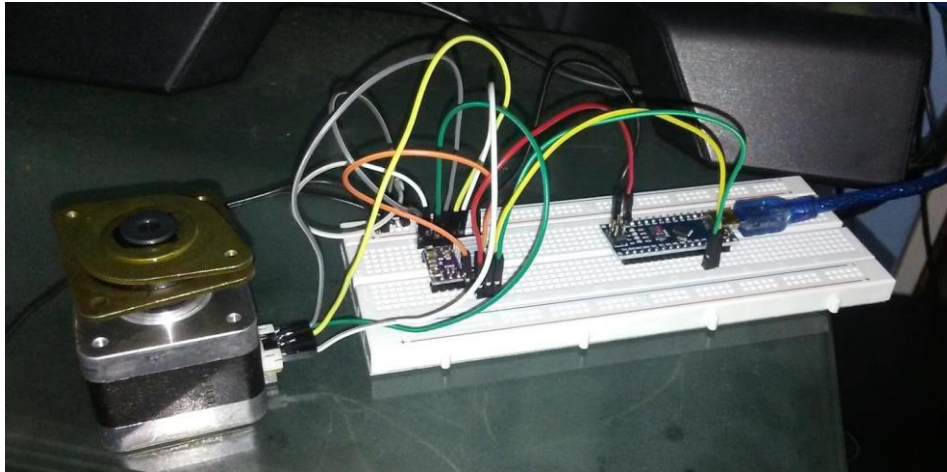


Figura 53. Circuito en funcionamiento para control de motor de movimiento horizontal

4.1.2. Pruebas de equipos en conjunto

Para las pruebas de control con todos los equipos integrados, luego de haberse solucionado problemas de interferencia de comunicación entre ellos y el computador, se logró controlar de manera conjunta desde una sola interfaz en LabView a todos los equipos según el algoritmo propuesto en la descripción del programa principal.

En las figuras 54-56 se muestran las configuraciones realizadas para los equipos principales. Se configura puerto COM9, que es la interfaz serial de comunicación detectada automáticamente por la PC, y también el diámetro del láser enfocado, que se asume de momento que sea de 50um (0.05mm). El tiempo de test láser es solo para realizar una prueba individual para el láser.

Para el caso del motor horizontal, se dejarán las configuraciones por defecto del motor, que son de velocidad máxima 4mm/s y 1mm para movimientos individuales de prueba (llamados movimientos de joystick). Nótese que aquí no hay un puerto COM serial dado que el controlador cuenta con un programa instalado en la PC que realiza todos los procedimientos de comunicación con el equipo. Antes de empezar a utilizar el sistema, es importante es aplicar el botón de Home Motor, que realiza el regreso de la base horizontal a su posición inicial, lo cual a su vez coloca automáticamente a 0mm la posición actual de la base. Con esto ya se tiene fijado un punto de referencia de la máquina, que es hacia donde se tendrá direccionado el láser.



Figura 54. Configuración de láser

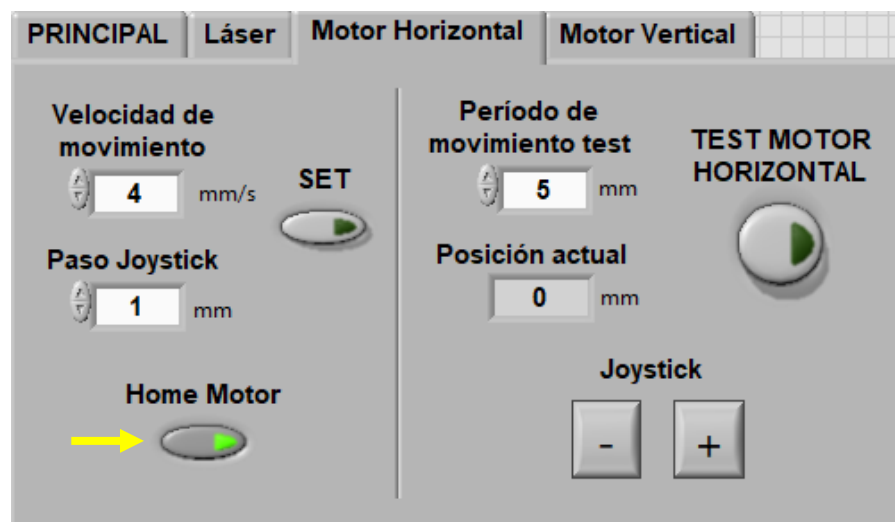


Figura 55. Configuración de Motor Horizontal

El motor vertical también cuenta con un puerto de comunicación COM8, que es la comunicación con el Arduino, el cual cuenta con un programa cargado (ver Anexos) que recibe comandos desde la interfaz de LabView cuando se presiona el botón SET. Se está configurando para tener un movimiento vertical de 1cm (10mm), con una velocidad de movimiento de 10mm/s. Esta velocidad es muy importante para la realización de pruebas de quemado de fibra, ya que de esta velocidad depende cuánto tiempo efectivo estará expuesta la fibra al láser incidente.

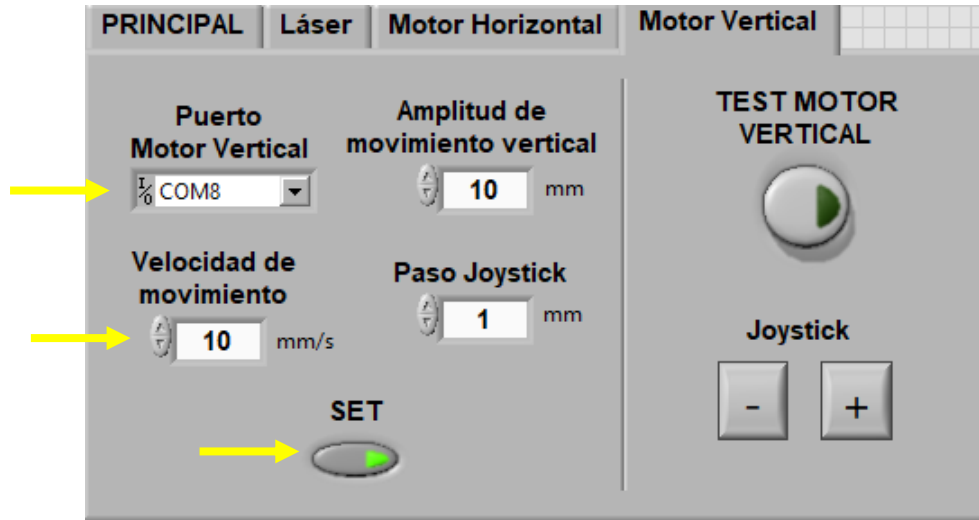


Figura 56. Configuración de Motor Vertical

Para entender mejor cómo influye el movimiento vertical en el proceso de quemado, se puede ver en la figura 57 a la fibra óptica a la cual se le va a incidir el láser enfocado a 50um. El punto focalizado se mueve verticalmente con la velocidad configurada en la interfaz (figura 56), que en este caso es 10mm/s. Si no se tuviera este movimiento vertical, los puntos no serían quemados de manera uniforme a lo largo de la sección transversal de la fibra.

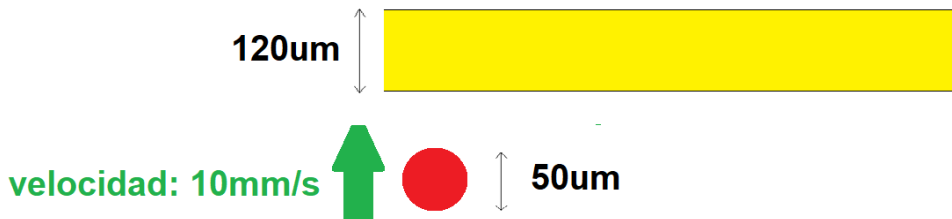


Figura 57. Vista frontal de láser incidente sobre fibra

Luego de realizadas las configuraciones de los equipos, se procede a configurar la potencia del láser, el período de la red y el número de períodos a grabar en la fibra, es decir, el número de puntos de laseo que incidirán sobre ella (figura 58). Para las pruebas realizadas sin fibra, se usó como material de quemado una hoja montada sobre la base horizontal con ayuda de un soporte, en donde se quemaron 5 puntos (número de períodos = 5) con un espaciamiento de 5mm, lográndose todos los movimientos requeridos para el sistema. Una vez que todos los puntos son quemados, la secuencia del programa hace que la base horizontal retorne automáticamente todo lo avanzado durante el proceso. Se tiene un

indicador de cuántos períodos están siendo grabados en cada instante de tiempo (en la figura 58, son 3 períodos grabados), y también un indicador del estado de funcionamiento del sistema (“GRABANDO”, “RETORNANDO BASE”, “FINALIZADO”).

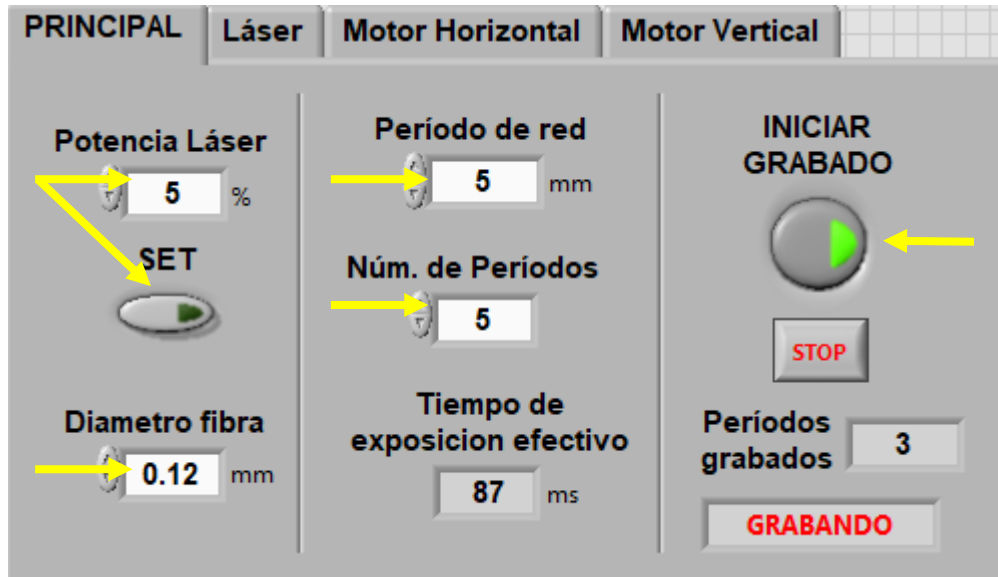


Figura 58. Puesta en marcha de programa principal

En la figura 59, se ve el montaje final del sistema de fabricación, donde también se puede ver la interfaz del software LabView en el computador. Por otra parte, en la figura 60 se observa el haz de apuntamiento del láser hacia la fibra óptica tensada en el soporte mecánico. El tensado se realiza mediante la sujeción de dos bloques hacia cada lado de la fibra, guiados en un canal micrométrico para ellas. Cabe resaltar que el haz de quemado en realidad es invisible, ya que se encuentra en el espectro infrarrojo, y en la imagen se activó de manera momentánea el visualizador visible del láser.

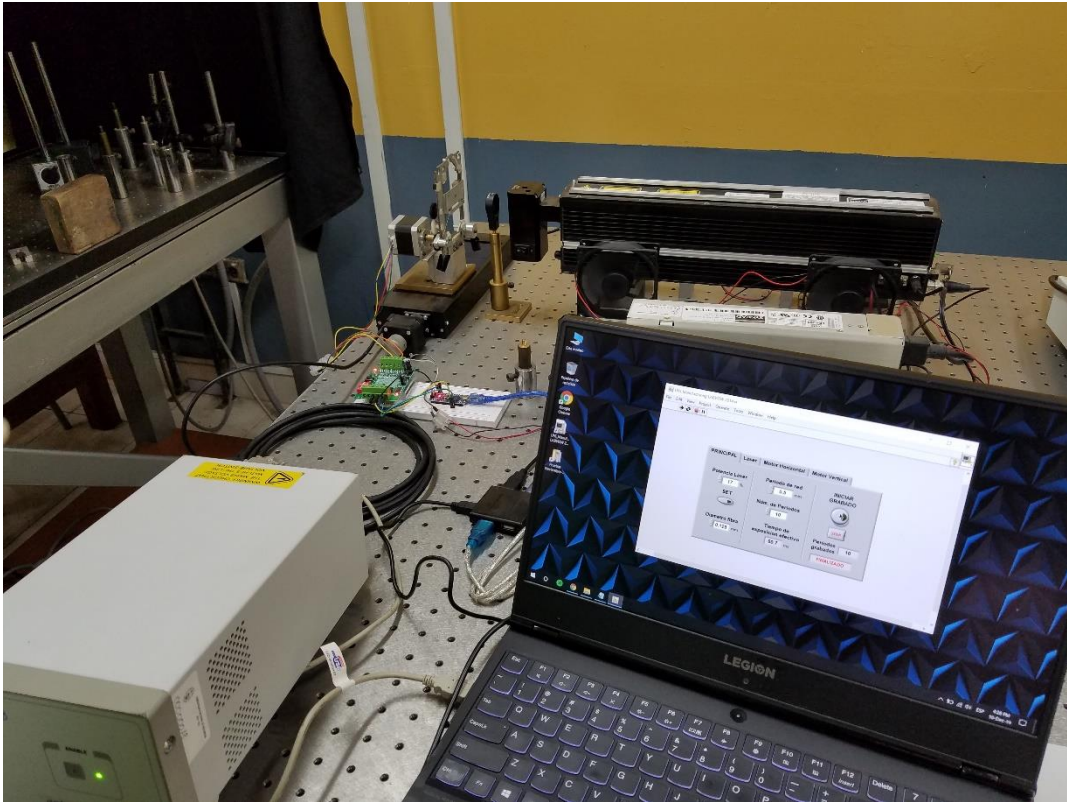


Figura 59. Montaje final del sistema

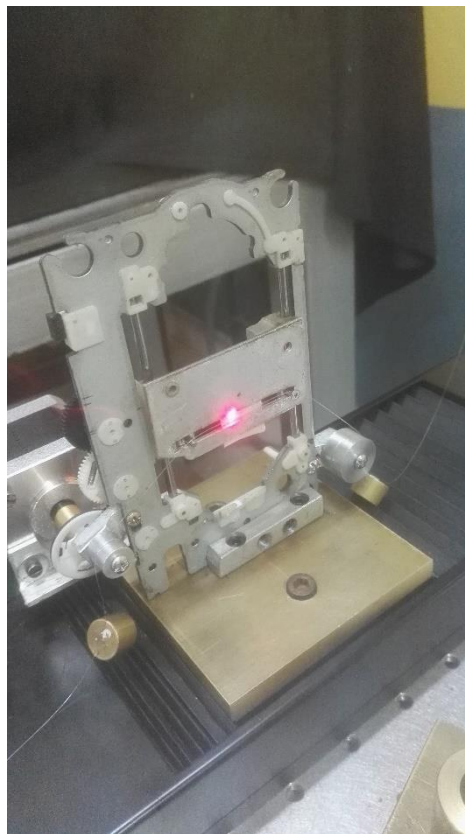


Figura 60. Soporte principal de fibra

4.2. Obtención de fibras LPG uniformes

Fueron realizados una gran cantidad de grabados en fibra y horas de experimentación, hasta obtener los parámetros adecuados para los cuales se obtenga una red de puntos grabados uniformemente a lo largo de la fibra. Los parámetros óptimos encontrados fueron los siguientes:

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------|--------------|
| Diámetro de fibra | 125um |
| Potencia del láser (Máx. 10W) | 17.0% |
| Diámetro de láser enfocado | 20µm |
| Tiempo de exposición | 60ms |
| Velocidad motor vertical | 7mm/s |
| Período de la red | 500um |
| Peso total del tensado | 8g |
| Número de períodos | 10 |

Recordar que el tiempo de exposición se controla mediante la velocidad del motor vertical. Por otra parte, se tuvieron que realizar múltiples pruebas hasta encontrar el punto de enfoque del láser, ya que este debe ser lo más pequeño posible para aprovechar toda la potencia del láser en la fibra. Finalmente, de las pruebas se dedujo que si la potencia del láser es muy baja, no se llega a la temperatura de quemado de la fibra, y por tanto esta no se desintegra; y si por el contrario la potencia fuera muy alta, habría que reducir el tiempo de exposición para que no se rompa la fibra, pero al reducirlo, no habría suficiente tiempo para que la fibra se queme a lo largo de toda su sección, solo lo hace por un lado. Es por ello que resulta muy importante haber llegado a los parámetros óptimos para la obtención de las fibras tipo LPG, ya que esto permitirá que se pueda replicar el resultado continuamente y a un nivel alto de calidad. Se verificó posteriormente que en la fibra se ha grabado una red LPG uniforme, para lo cual se realizó la inspección microscópica (figuras 61 y 62). Este resultado fue replicado 10 veces, para 10 fibras distintas, y fueron almacenadas en el laboratorio para su futuro uso.

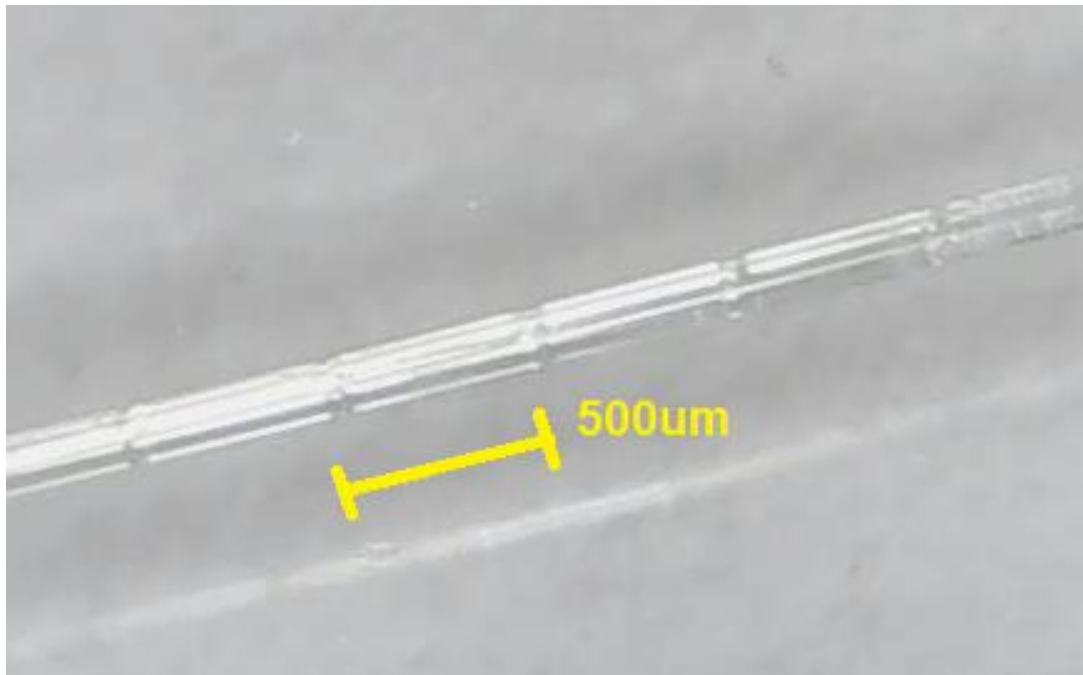


Figura 61. Fibra tipo LPG grabada por el sistema final

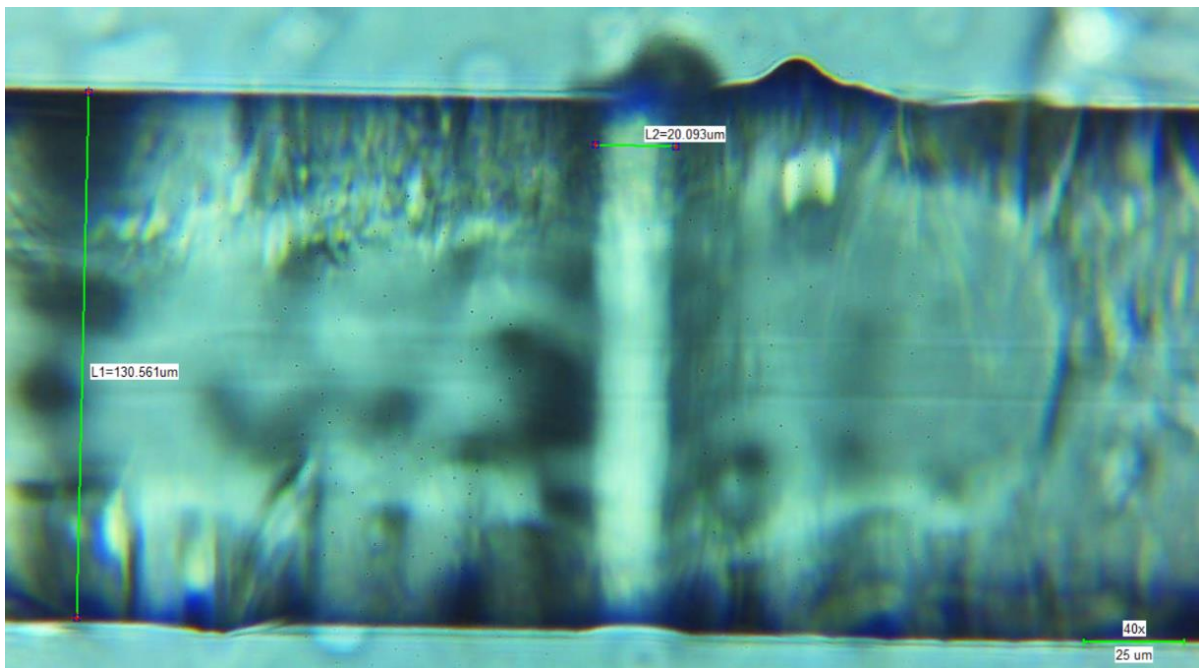


Figura 62. Utilización de microscopio con acercamiento x40. Se cuantifica el diámetro de la fibra y del láser focalizado.

4.3. Aplicación de fibra LPG como sensor de deformación

Posteriormente a la obtención de la fibra LPG, esta fue probada para verificar su capacidad de detección de magnitudes físicas. Para ello, se realizó la aplicación como sensor de deformación en una configuración de voladizo.

En primer lugar, se realizó la fusión de la fibra LPG en sus dos extremos con pigtails (figura 63). El resultado de ello fue la obtención de una única fibra de mayor tamaño y con conectores para los equipos.

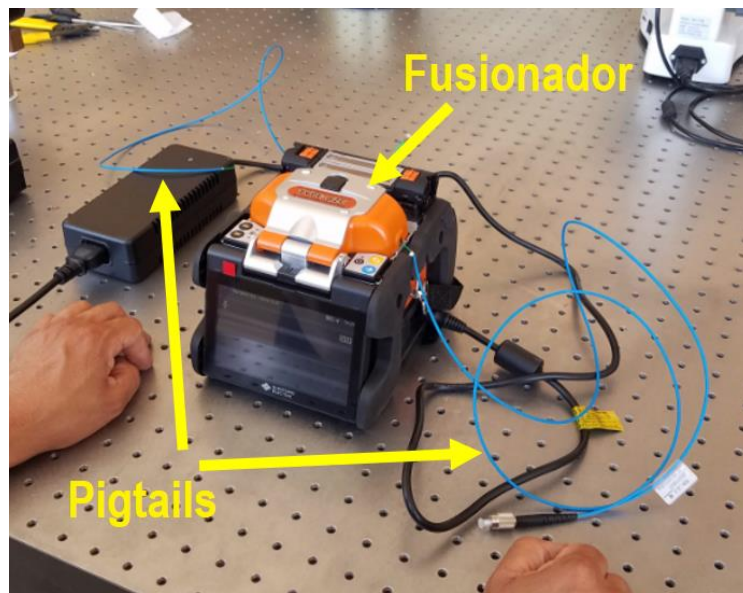


Figura 63. Proceso de fusión de fibra LPG (ubicada al interior del fusionador) con pigtails que poseen conector

En la figura 64, se ve el montaje del experimento. Una fuente emite luz en el rango del espectro infrarrojo. La fibra de los pigtails (color azul), está empalmada con la fibra LPG, la cual se encuentra adherida al voladizo metálico. El otro extremo de la fibra está conectada a un fotodetector que opera dentro del rango de luz de la fuente. La señal eléctrica es finalmente enviada a un osciloscopio, en donde puede verse la señal de vibración (figura 66) al aplicarse una deformación transversal en la punta del voladizo, de modo que este empieza a vibrar. En la figura 65 se tiene el esquema del voladizo, donde puede notarse que una deformación $z(x)$ provoca que la fibra sufra una deformación transversal, lo cual se sabe que altera el espectro de transmitancia. Pueden encontrarse por R. Digilov^[12] y C. Shi^[16] un modelo teórico de esta aplicación.

Con este resultado, se puede afirmar que la fibra LPG grabada posee la capacidad de realizar mediciones, de la manera en que se vio en la parte teórica.

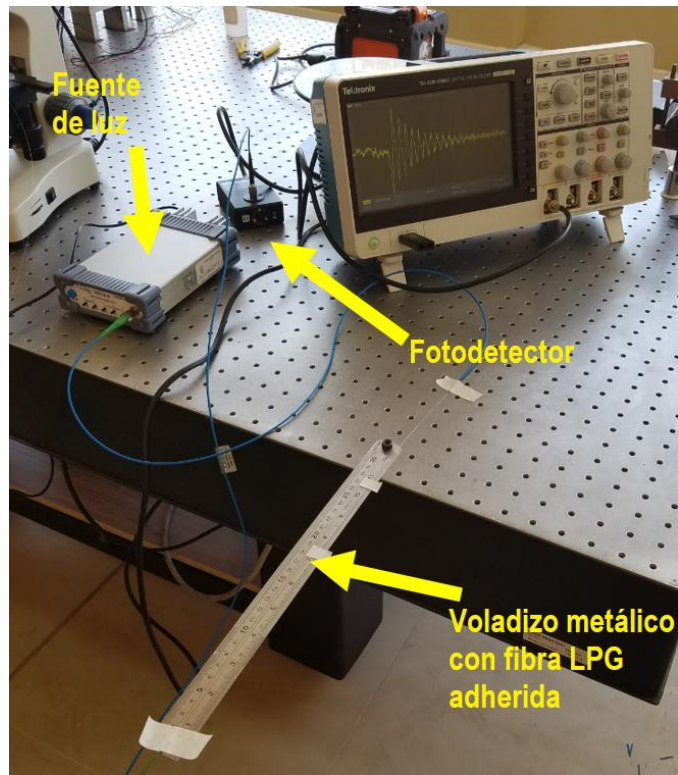


Figura 64. Disposición del experimento de sensor de deformación en configuración voladizo

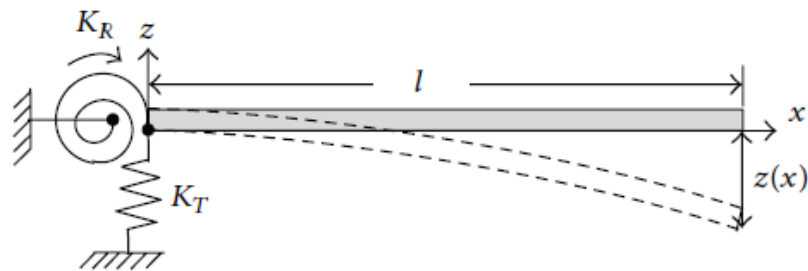


Figura 65. Esquema de configuración de voladizo

Finalmente, como trabajo a futuro, se busca disponer de un analizador espectral con el que se pueda visualizar en tiempo real el espectro de transmitancia. Posterior a ello, podría elaborarse un trabajo de calibración del sensor, contrastando la desviación de la curva contra valores reales de deformación, de manera que se tenga un sensor completamente funcional. Adicional a ello, también podría usarse la fibra LPG en otras aplicaciones, por ejemplo la de sensor de temperatura, como la desarrollada por M. García et al^[13].

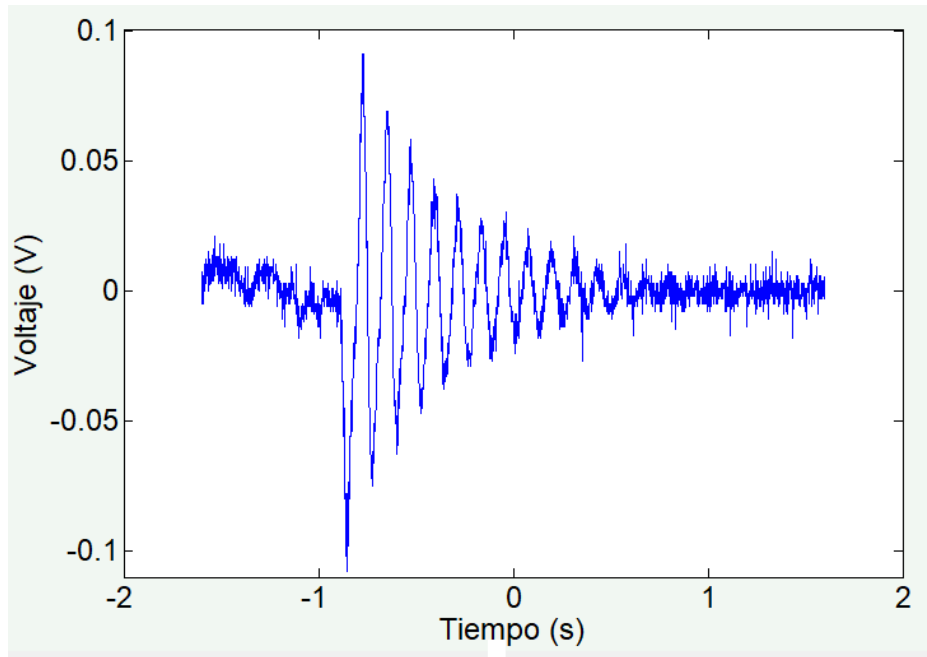


Figura 66. Señal de deformación obtenida

CONCLUSIONES

- Se realizó un estudio de la tecnología de fibra óptica y su uso como sensores, así como las redes período corto y largo, equipamiento relacionado, y los detalles teóricos de la medición de deformación usando fibras grabadas.
- Se realizó el diseño del sistema para la automatización del grabado de redes LPG en fibras ópticas, tanto de la parte electromecánica y equipos, como de software.
- Se realizó la implementación del sistema de alimentación, protección eléctrica y control de todos los equipos utilizados en el sistema, así como el montaje mecánico de los equipos, soportes y tensado de fibras.
- Se implementó el programa en LabView para el control del láser de CO₂ y motores de movimiento horizontal/vertical, obteniéndose el control total de estos equipos. Las pruebas integradas en conjunto fueron satisfactorias, de acuerdo a los parámetros ingresados desde la interfaz en el computador.
- Se realizaron pruebas con el sistema hasta obtener fibras ópticas grabadas con una red de puntos uniforme, la cual se verificó a través de microscopía.
- Con las fibras grabadas se desplegó una aplicación mecánica en configuración de voladizo, obteniéndose en el osciloscopio señales de deformación, indicando así que la fibra LPG está lista para ser usada como sensor en otras aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

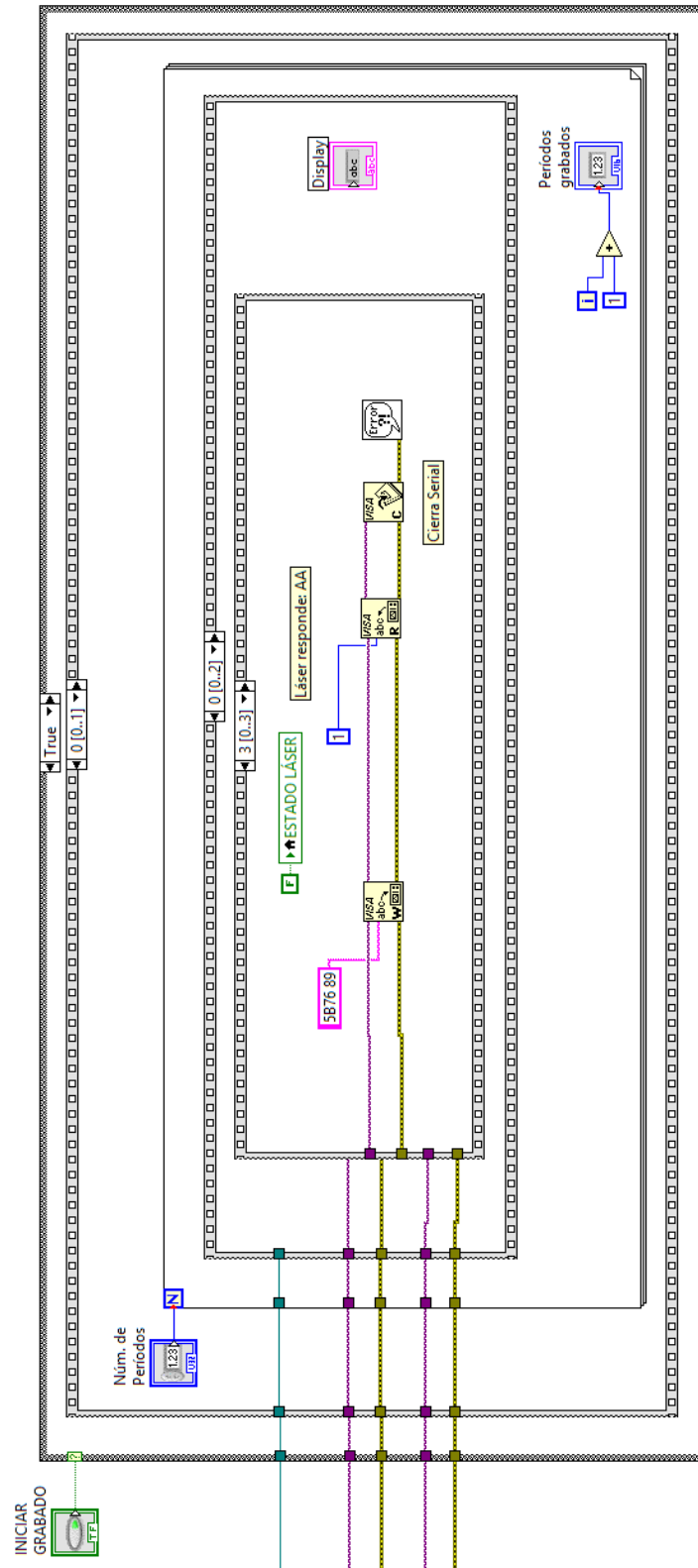
- [1] Measures, R. (2001). *Structural Monitoring with Fibre Optic Technology*. Academic Press.
- [2] Loupus, K. & Amditis, A. (2017). Structural Health Monitoring Fiber Optic Sensors. In I. Matias, S. Ikezawa & J. Corres, *Fiber Optic Sensors* (pp. 185–206). Springer.
- [3] Glišić, B. & Inaudi, D. (2007). *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. Wiley.
- [4] Powers, J. (1996). *An introduction to Fiber Optic Systems*. McGraw-Hill.
- [5] Krohn, D., MacDougall, T. & Mendez, A. (2014). *Fiber Optic Sensors*. Spie Press.
- [6] Sabri, N., Aljunid, S., Salim, M. & Fouad, S. (2015). Fiber Optic Sensors: Short Review and Applications. In F. Gaol, K. Shrivastava & J. Akhtar, *Recent Trends in Physics of Material Science and Technology* (pp. 299–311). Springer.
- [7] Nath, P., Datta, P. & Sarma, K. (2007). All Fiber-Optic Sensor for Liquid Level Measurement. *Macrowave and Optical Technology Letters*, 50 (7), 1982–1984. DOI 10.1002/mop.
- [8] Nemoto, T., Hashimoto, Y., Sato, S. & Iitaka, H. (1998). An Optical Fiber Flow Speed Sensor of Increased Sensitivity. *Electrical Engineering in Japan*, 125 (1), 1-8.
- [9] Bo, L., Jianhua, L. & Guiyun, K. (2007). Temperature and Strain Sensor Based of Weak LPG and Fiber Ring Down. *Macrowave and Optical Technology Letters*, 50 (7), 111–114. DOI 10.1002/mop.

- [10] Kim, S., Park, J. & Han, W. (2008). Optical Fiber AC Voltage Sensor. *Macrowave and Optical Technology Letters*, 51 (7), 1689–1691. DOI 10.1002/mop.
- [11] Majumder, M. Gangopadhyay, T., Chakraborty, A., Dasgupta, K. & Bhattacharya, D. (2008). Fibre Bragg gratings in structural health monitoring – Present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147, 150–164. DOI 10.1016/j.sna.2008.04.008.
- [12] Digilov, R., Abramovich, H. (2007). Flexural Vibration Test of a Beam Elastically Restrained at One End: A New Approach for Young's Modulus Determination. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/329530>.
- [13] Sigifredo, M., Velázquez, J., Pulido, M., González, E., Mujica, S. & Martínez, F. (2015). Temperature sensing on tapered single mode fiber using mechanically induced long period fiber gratings. *Proceedings of SPIE*, 9577, 95770K-1–95770K-11. DOI 10.1117/12.2186505.
- [14] Vengsarkar, A., Lemaire, P., Judkins, J., Bhatia, V., Erdogan, T. & Sipe, J. (1996). Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters. *Journal of Lightwave Technology*, 14 (1), 58–65. DOI 10.1002/mop.
- [15] Chan, H., Alhassen, F., Tomov, I. & Lee, H. (2008). Fabrication and Mode Identification of Compact Long-Period Gratings Written by CO₂ Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 20 (8), 611–613. DOI 10.1002/mop.
- [16] Shi, C., Zhu, T., Rao, Y. & Deng, M. (2010). Fiber Optic Accelerometer Based on Long Period Fiber Grating Induced by CO₂ Laser Pulses. *Macrowave and Optical Technology Letters*, 53 (4), 841–845. DOI 10.1002/mop.

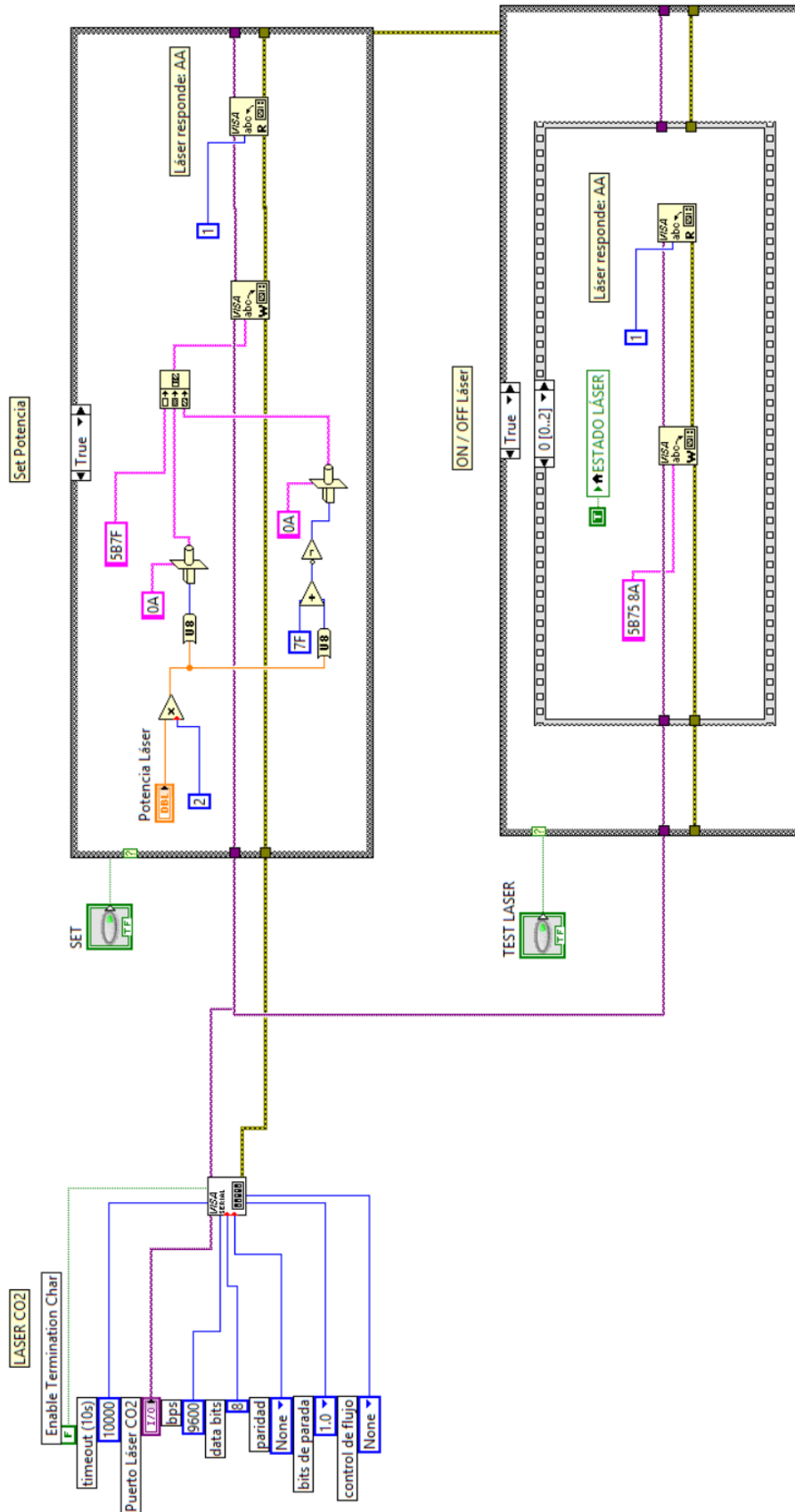
ANEXOS

A. Código en LabView

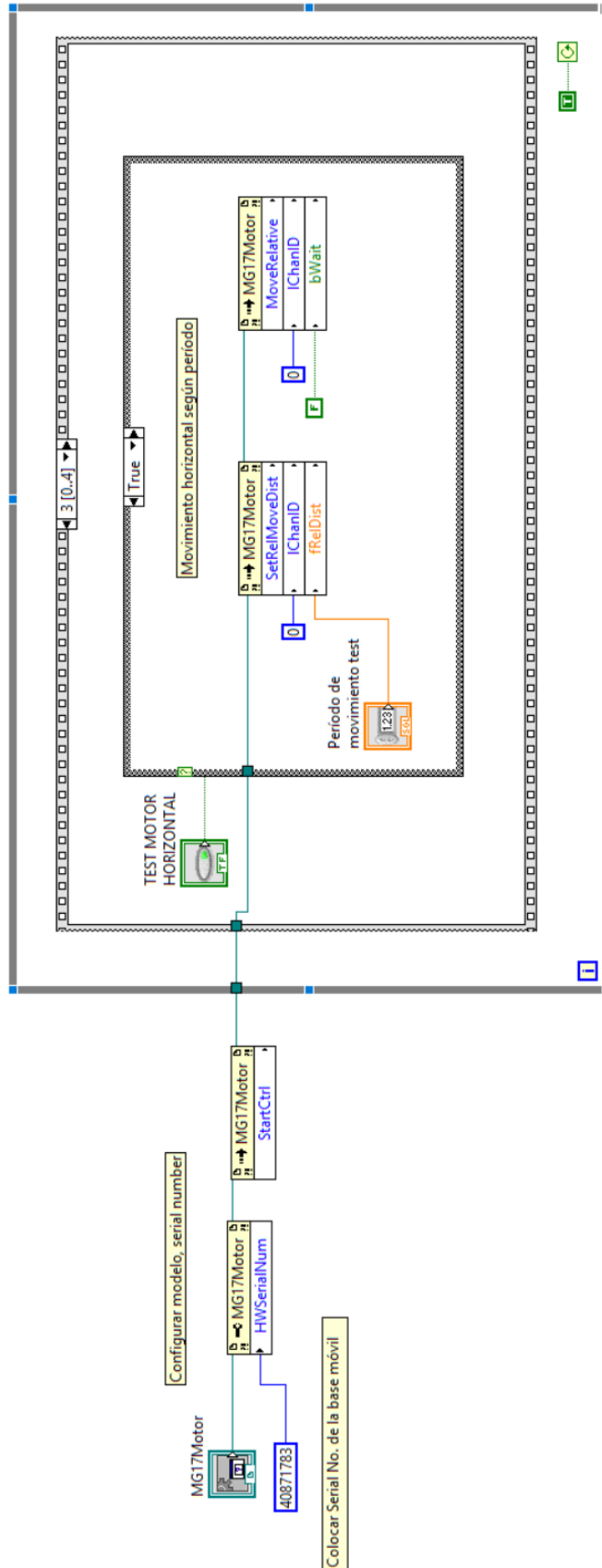
A.1. Programa principal



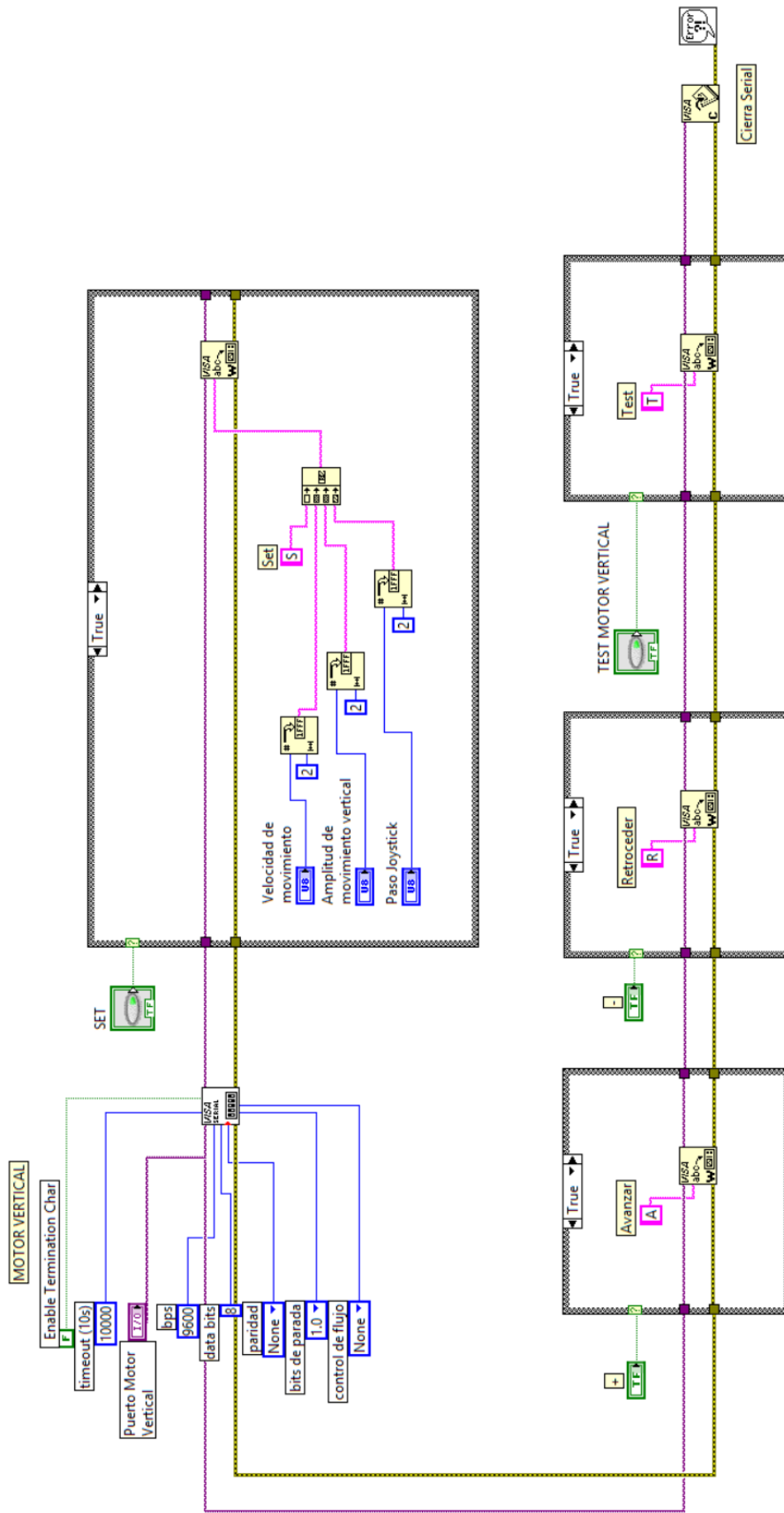
A.2. Control de láser CO2



A.3. Control de motor de movimiento horizontal



A.4. Control de motor de movimiento vertical



B. Código en Arduino para control de motor a pasos vertical

```
const int dirPin = 8; //1:horario, 0:antihorario
const int stepPin = 9; //cada cambio en este pin mueve un paso

int steps_1mm = 19; //en pruebas, se tuvo que con 19 pasos se avanza 1mm
int steps_paso_joy = 19; //es decir por defecto el paso joystick seria 1mm
int steps_test = 190; //por tanto el test por defecto sería de 10mm de carrera
unsigned long stepDelay = 10526; //10526us de delay entre cada paso, con esto por defecto la velocidad seria 5mm/s
// NOTA. FORMULA DE LA VELOCIDAD: stepDelay = 1000000 / (steps_1mm * velocidad)
char incomingByte = 0; //bytes que se van recibiendo
int velocidad;
int amplitud;
int paso_joy;

void setup() {
    // Configura pines como salida
    pinMode(dirPin, OUTPUT);
    pinMode(stepPin, OUTPUT);
    // Inicializa comunicacion serial
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {
    if (Serial.available() > 0) {
        // leer datos del LabView
        incomingByte = Serial.read();
        switch(incomingByte) {
            case 'S':
                leerConfiguracionSet();
                break;

            case 'A':
                avanzarPaso();
                break;

            case 'R':
                retrocederPaso();
                break;

            case 'T':
                testVertical();
                break;
        }
    }
}

void leerConfiguracionSet(){
    // VELOCIDAD
    while(!Serial.available()){
        incomingByte = Serial.read(); // lee primer dígito (decenas) en formato string
        velocidad = 10 * (incomingByte - 48); // obtiene el primer dígito en decimal
        while(!Serial.available()){
```



```

    incomingByte = Serial.read(); // lee segundo digito (unidades) en
formato string
    velocidad = velocidad + (incomingByte - 48); // obtiene el segundo
digito en decimal y lo suma al primero
    stepDelay = (unsigned long)(1000000 / (steps_1mm * velocidad)); //
calcula el tiempo de step en ms segun la velocidad configurada desde
labview

// AMPLITUD DE MOVIMIENTO VERTICAL
    while(!Serial.available()){
        incomingByte = Serial.read(); // lee primer digito (decenas) en formato
string
        amplitud = 10 * (incomingByte - 48); // obtiene el primer digito en
decimal. Se resta 48 porque el digito es ASCII
        while(!Serial.available()){
            incomingByte = Serial.read(); // lee segundo digito (unidades) en
formato string
            amplitud = amplitud + (incomingByte - 48); // obtiene el segundo digito
en decimal y lo suma al primero
            steps_test = steps_1mm * amplitud;

// PASO JOYSTICK EN mm
            while(!Serial.available()){
                incomingByte = Serial.read(); // lee primer digito (decenas) en formato
string
                paso_joy = 10 * (incomingByte - 48); // obtiene el primer digito en
decimal
                while(!Serial.available()){
                    incomingByte = Serial.read(); // lee segundo digito (unidades) en
formato string
                    paso_joy = paso_joy + (incomingByte - 48); // obtiene el segundo digito
en decimal y lo suma al primero
                    steps_paso_joy = steps_1mm * paso_joy;
                }
            }

void avanzarPaso(){
    // Direccion horaria
    digitalWrite(dirPin, LOW);
    // Giramos el motor segun el numero de steps_paso_joy
    for (int i = 0; i < steps_paso_joy; i++) {
        digitalWrite(stepPin, HIGH);
        digitalWrite(stepPin, LOW);
        delayMicroseconds(stepDelay);
    }
}

void retrocederPaso(){
    // Direccion antihoraria
    digitalWrite(dirPin, HIGH);
    // Giramos el motor segun el numero de steps_paso_joy
    for (int i = 0; i < steps_paso_joy; i++) {
        digitalWrite(stepPin, HIGH);
        digitalWrite(stepPin, LOW);
        delayMicroseconds(stepDelay);
    }
}

void testVertical(){
    // Direccion horaria (ida)
    digitalWrite(dirPin, LOW);

```

```

// Giramos el motor segun el numero de steps_test
if ( ((unsigned long)(stepDelay/2)) > 13000 ) {
  for (int i = 0; i < steps_test; i++) {
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    delay(13); // delayMicroseconds solo funciona bien hasta 13383
según documentación de Arduino
    delayMicroseconds( ((unsigned long)(stepDelay/2)) - 13000 ); //
por ello se coloca primero un delay en milisegundos y luego la resta en
micros
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delay(13);
    delayMicroseconds( ((unsigned long)(stepDelay/2)) - 13000 );
  }
} else {
  for (int i = 0; i < steps_test; i++) {
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    delayMicroseconds( (unsigned long)(stepDelay/2));
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delayMicroseconds( (unsigned long)(stepDelay/2));
  }
}

delay(1000);

// Direccion antihoraria (regreso)
digitalWrite(dirPin, HIGH);
// Giramos el motor segun el numero de steps_test
if ( ((unsigned long)(stepDelay/2)) > 13000 ) {
  for (int i = 0; i < steps_test; i++) {
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    delay(13); // delayMicroseconds solo funciona bien hasta 13383
según documentación de Arduino
    delayMicroseconds( ((unsigned long)(stepDelay/2)) - 13000 ); //
por ello se coloca primero un delay en milisegundos y luego la resta en
micros
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delay(13);
    delayMicroseconds( ((unsigned long)(stepDelay/2)) - 13000 );
  }
} else {
  for (int i = 0; i < steps_test; i++) {
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    delayMicroseconds( (unsigned long)(stepDelay/2));
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delayMicroseconds( (unsigned long)(stepDelay/2));
  }
}
}

```