



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA

DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS MULTIDISCIPLINARIOS

“SENSOR DE FUERZA EN FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA POR MEDIO DE MODULACIÓN ESPECTRAL”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

***MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA APLICADA***

PRESENTA:

ING. ALFREDO MURRIETA LOYDE

DIRECTORES:

***DRA. RUTH IVONNE MATA CHÁVEZ
DR. CARLOS RODRÍGUEZ DOÑATE***

Yuriria, Gto.

Noviembre 2024

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada para mis estudios de la maestría y por el artículo titulado “Diseño y Caracterización de un Sensor de Glucosa en Fibra Óptica Plástica” No.CDX106. También por el proyecto titulado “Acoplador de Fibra Óptica Plástica como Sensor de Porcentaje de Solutos”. LXVI-007140.



Al Departamento de Estudios Multidisciplinarios (Sede Yuriria) de la Universidad de Guanajuato por brindarme asistencia durante la Maestría y que me proporcionó todos los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto de tesis.



Campus Irapuato-Salamanca | División de Ingenierías

Dedicatorias

A Dios Padre, Hijo y Espíritu Santo y el Universo por brindarme salud y la fuerza necesaria para concluir con esta etapa de mis estudios de maestría. Gracias, gracias, gracias, Dios por bendecirme abundantemente y por estar siempre conmigo en todos mis proyectos y fortalecer mi Fe y Espíritu.

A mi mamá por su bendición, amor y el apoyo brindado incondicionalmente en esta etapa de mi vida. A mi papa que sé que me bendice desde donde está.

A mis hermanas por su paciencia y comprensión.

A mis sobrinos por estar siempre brindándome su energía y alegría.

A mi directora de tesis la Dra. Ruth Ivonne Mata Chávez por enseñarme y dirigirme en la realización de este proyecto para que se cumplieran los objetivos con excelentes resultados.

A mi codirector el Dr. Carlos Rodríguez Doñate por asesorarme y estar siempre atento en el cumplimiento de este proyecto.

A la Dra. Mónica Trejo Durán por brindar su apoyo para la realización de este trabajo mediante el seguimiento de tesis.

Al Dr. Geovanni Hernández Gómez por estar al pendiente en el avance del proyecto con el seguimiento de tesis y recordarme sobre mis estudios de inglés.

Al Dr. Leonardo Martínez Jiménez por su atención brindada en las clases y dudas durante la maestría.

A la Mtra. Yeraldyn Guzmán Castro por su enseñanza en los instrumentos del laboratorio de sensores ópticos.

Al Mtro. José Manuel López Villagómez por compartir sus conocimientos y apoyo en el laboratorio de sensores ópticos.

A mis compañeros de la maestría que me apoyaron en las clases.

A mi amigo Tony por su apoyo y consejos durante el proceso de mi maestría.

Resumen

Esta tesis se enfoca en el estudio y desarrollo de sensores de fuerza de fibra óptica plástica por medio de la modulación espectral en el siguiente contexto:

En este estudio experimental se examina la variación del ancho espectral del pico de potencia de un láser He-Ne a 632 nm en relación con la fuerza aplicada de forma lateral a una fibra óptica de plástico de 1 mm de diámetro y 7 cm de largo. Se utiliza un acoplador de fibra óptica de plástico (POF) con un factor de acoplamiento de 50:50 y 2x2 puertos que conecta a una sola fibra desbastada como lazo. Se trabaja sobre un área desbastada de menos de 2 cm en la fibra óptica, de la cual se registra gradualmente la modulación del pico en un rango de fuerza aplicada de 0-500N. Se hicieron pruebas del experimento con desbastes diametrales sobre la superficie de la fibra en forma de D, V y cilíndrico. Como resultados se encontraron fluctuaciones que mostraron un estrechamiento en el ancho de banda del pico espectral en función de la fuerza aplicada, efectos derivados de la perturbación del lazo. El desbaste tipo D al 30% mostró la mayor sensibilidad de 14.2 pm/N en un intervalo de 12.5 nm. El dispositivo se puede utilizar como un sensor para aplicaciones industriales o comerciales económicas que requieren un sistema de medición con un intervalo muy pequeño o que no alteren el producto.

Abstract

This thesis focuses on the study and development of plastic fiber optic force sensors by means of spectral modulation in the following context:

This experimental study examines the variation in the spectral width of the peak power of a He-Ne laser at 632 nm in relation to the force applied laterally to a plastic optical fiber 1 mm in diameter and 7 cm long. A plastic fiber optic coupler (POF) with a coupling factor of 50:50 and 2x2 ports is used that connects to a single roughened fiber as a loop. Work is done on a roughened

area of less than 2 cm in the optical fiber, from which peak modulation is gradually recorded in an applied force range of 0-500N. The experiment was tested with diametrical slabs on the surface of the fiber in the shape of D, V and cylindrical. As results, fluctuations were found that showed a narrowing in the bandwidth of the spectral peak as a function of the force applied, effects derived from the disturbance of the loop. The 30% type D roughing showed the highest sensitivity of 14.2 pm/N in a range of 12.5 nm. The device can be used as a sensor for economical industrial or commercial applications that require a measurement system with a very small range or that do not alter the product.

Índice General

Agradecimientos.....	ii
Dedicatorias	iii
Resumen	v
Abstract.....	v
<i>Índice General</i>	vii
<i>Índice de Figuras</i>	x
<i>Índice de Tablas</i>	xii
Capítulo 1	1
I. Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Los sensores de fibra óptica.....	1
1.3 Justificación.....	5
1.4 Hipótesis.....	6
1.5 Objetivo general.....	6
1.6 Objetivos específicos	7
1.7 Organización de la tesis	7
Referencias.....	9
Capítulo 2	13
Resumen	13
II. Marco Teórico	13
2.1 La Fibra Óptica de Plástico (FOP).....	13
2.1.1 La fibra óptica.....	13
2.1.2 Tipos de fibra óptica por el material en el núcleo y revestimiento.	14
2.1.3 Categorización de fibras ópticas de acuerdo con el modo de propagación.	15
2.2 Características de la luz.....	16

2.2.1	Reflexión y refracción de la luz.	18
2.2.2	Ley de Snell.	20
2.2.3	Apertura numérica.....	21
2.3	Fibra óptica de plástico.....	22
2.3.1	Ventajas y desventajas de la fibra óptica de plástico.	24
2.3.2	Aplicaciones de las fibras ópticas de plástico.	25
2.3.3	Fuentes de luz.	26
2.4	Polarizador Óptico.	26
2.5	Acopladores de Fibra Óptica.....	28
2.6	Sensores de Fibra Óptica [23].	30
2.7	El sensor óptico se clasifica como intrínseco o extrínseco según su ubicación [34].	31
2.8	Sensores de fibra óptica basados en modulación.....	33
2.8.1	Sensores de fibra óptica por intensidad modulada.	33
2.8.2	Sensor de fibra óptica modulado por longitud de onda.	33
2.8.3	Sensor de fibra óptica de fase modulada.	34
2.8.4	Sensores de dispersión	34
2.8.5	Sensores de polarización.....	34
2.8.6	Sensores de fibra óptica de modo espectral.....	34
	Referencias.....	36
Capítulo 3	42
Resumen.	42
III. Metodología.....	42
3.1	Elaboración de conectores para acoplar FOP de diferentes diámetros.	42
3.2	Caracterización de las fibras ópticas plásticas (FOP).	43
3.3	Caracterización del acoplador de fibra óptica de plástico.....	45
3.4	Proceso para la modificación diametral de la FOP.	47
3.4.1	Preparación y desbaste diametral de forma en D al 30%.....	47
3.4.2	Desarrollo del desbaste en forma de D al 50% en la estructura del diámetro de la FOP... 50	
3.4.3	Proceso para obtener el desbaste en V al 30% y 50% en la estructura de la FOP.....	52
3.4.4	Proceso para obtener el desbaste cilíndrico al 30% y 50% en la estructura de la FOP.	53
3.5	Empalme mecánico de las fibras ópticas desbastadas al acoplador.	54

Referencias.....	57
Capítulo 4	58
Resumen.	58
IV. Sensor de fuerza de fibra óptica de plástico por medio de modulación espectral. (Resultados) ...	58
4.1 Caracterización inicial sin desbaste.	58
4.1.1 Caracterización de la FOP de 0.25mm.	59
4.1.2 Caracterización de la FOP de diámetro 0.5mm.	60
4.1.3 Caracterización para la FOP con $\varnothing=0.75\text{mm}$	61
4.1.4 Caracterización de la FOP con $\varnothing=1\text{mm}$	62
4.1.5 Análisis de las 4 fibras ópticas de plástico con diferente diámetro.....	63
4.2 Resultados de la caracterización de la FOP como lazo sin desbaste y con desbaste.	64
4.2.1 Caracterización del lazo de FOP sin desbaste en su diámetro.....	65
4.2.2 Respuesta del lazo de FOP con desbaste diametral en D al 30% de profundidad.....	69
4.2.3 Experimento con lazo de FOP con desbaste diametral en D al 50%.....	71
4.2.4 Comportamiento del lazo como sensor de Fuerza con desbaste en D.....	75
4.2.5 Resultados del experimento con lazo de FOP con desbaste diametral en V al 30%.	76
4.2.6 Experimento con lazo de FOP con desbaste diametral en V al 50%.....	80
4.2.7 Análisis de los resultados del comportamiento del lazo sensor de FOP con desbaste en V. 83	
4.2.8 Experimento con lazo de FOP con desbaste cilíndrico al 30%.....	84
4.2.9 Resultados del lazo de FOP con desbaste cilíndrico al 50%.....	87
4.2.10 Análisis de los resultados del comportamiento del lazo sensor de FOP desbaste cilíndrico al 30% y 50%.	89
4.3 Resumen de resultados:.....	90
Referencias.....	92
Capítulo 5	93
V. Conclusiones y trabajo a futuro.....	93
5.1 Conclusiones	93
Apéndice A	95
Publicaciones.	95
Congresos.....	95

Índice de Figuras

Figura 1. Partes de la fibra óptica.....	14
Figura 2. Clasificación de la fibra óptica por el tipo de material.	14
Figura 3. Propagación de un haz de luz en la fibra óptica monomodo.....	15
Figura 4. Varios rayos de luz en una fibra óptica multimodo.....	16
Figura 5. Fibra óptica de acuerdo con el modo de propagación de la luz.	16
Figura 6. Espectro electromagnético [12].	17
Figura 7. Características de una onda.....	18
Figura 8. Rayo de luz incidente reflejado y refractado entre dos medios.	19
Figura 9. Representación del ángulo crítico.	19
Figura 10. Reflexión total interna.....	20
Figura 11. Apertura numérica en la fibra óptica.	21
Figura 12. Comparación del núcleo de vidrio con el núcleo de las FOP.	23
Figura 13. Polarizador óptico.....	27
Figura 14. Acoplador de fibra óptica de 4 puertos.	28
Figura 15. Sensor intrínseco de fibra óptica.	31
Figura 16. Sensor extrínseco de fibra óptica.	32
Figura 17. Esquema de conectores para el lazo sensor de FOP.....	42
Figura 18. Conectores para unir el lazo de FOP con el acoplador óptico.	43
Figura 19. Diagrama esquemático para hacer pruebas de límite máximo de daño o fractura a las FOP.	44
Figura 20. Arreglo experimental usado en laboratorio de sensores.	45
Figura 21. Esquema y conexión física para la caracterización del acoplador de FOP [4].	46
Figura 22. Representación del diámetro original de la FOP y su desbaste en D al 30% [5].	47
Figura 23. Cortador de fibra óptica y segmento de FOP.....	48
Figura 24. . Fibra óptica de plástico sin recubrimiento.....	48
Figura 25. Base de vidrio y papel de lija fino.	49
Figura 26. Herramientas para hacer el desbaste mecánico en D.	50

Figura 27. Desbaste diametral final al 30% sobre la FOP en forma de D.	50
Figura 28. Esquema para el acabado del desbaste en D al 50% de la FOP.....	51
Figura 29. Instrumentos utilizados para observar y medir el desbaste.	51
Figura 30. FOP con desbaste D al 50% en la estructura diametral. a) con asperezas, b) sin asperezas.	52
Figura 31. FOP con desbaste diametral en V a diferentes. porcentajes.	52
Figura 32. Forma en V al 30 y 50% sobre la estructura de la FOP.	53
Figura 33. Representación del desbaste cilíndrico al: (a)30% y (b) 50% de la FOP.	54
Figura 34. Esquema de configuración para el experimento del empalme del lazo de FOP [9].	55
Figura 35. Arreglo físico del sensor de fuerza en el laboratorio de sensores.	56
Figura 36. Diagrama esquemático de pruebas de daño o fractura límite para las FOP.	59
Figura 37. Caracterización de la FOP de 0.25mm.	59
Figura 38. Variación de la intensidad al aplicar la fuerza sobre la FOP de $\varnothing=0.25\text{mm}$	60
Figura 39. Cambios de la intensidad al variar la fuerza sobre la FOP con $\varnothing=0.5\text{mm}$	61
Figura 40. Cambio en la intensidad al modular la fuerza sobre la FOP con $\varnothing=0.75\text{mm}$	62
Figura 41. Cambio en la potencia al modular la fuerza sobre la FOP de $\varnothing=1\text{mm}$	63
Figura 42. Diferencia de la potencia en función de la fuerza aplicada sobre las FOP.	64
Figura 43. Esquema del acoplador óptica con el lazo sensor de FOP sin desbaste [7].	65
Figura 44. Lazo de FOP sin desbaste a 0N.	66
Figura 45. Lazo de FOP sin desbaste aplicando 500N.	67
Figura 46. Amplitud de la medida con FOP sin desbaste a) 0N y b) 500N.	68
Figura 47. Configuración esquemática para aplicar fuerza en el lazo [8].	69
Figura 48. Amplitud de la medida a) 0N y b) 500N con lazo desbastado en D al 30%.	71
Figura 49. Lazo de FOP con desbaste en D al 50% a) 0N, b) 500N.	73
Figura 50. Potencia del espectro debida al lazo desbastada en D al 50% y fuerza en a) 0N y b)500N.	74
Figura 51. Respuesta del cambio espectral debida a la fuerza aplicada en lazo a) 30% y b) 50%.	76
Figura 52. Configuración para el lazo de FOP con desbaste en V al 30% y 50%.	77
Figura 53. Amplitud espectral resultante del sensor de FOP con desbaste en V al 30% en 0N y b) 500N.	78
Figura 54. Resultado del desplazamiento de los extremos del espectro en longitud de onda para a) 0N y b) 500N.	79

Figura 55. Espectro resultante del sensor desbastado en V al 50% en a) 0N y b) 500N de fuerza.....	81
Figura 56. Amplitud del espectro para el sensor de FOP con desbaste en D al 50% para a) 0N y b) 500N.....	83
Figura 57. Resultado de la sensibilidad en un $\Delta\lambda$ del sensor de FOP con desbaste V al a) 30% y b) 50%.....	84
Figura 58. Coordenadas del espectro con los cursores para localizar la longitud inicial y final.	85
Figura 59. Amplitud del espectro para el sensor de FOP con desbaste cilíndrico al 30% para a) 0N y b) 500N.....	86
Figura 60. Sensor de fuerza con lazo con desbaste cilíndrico al 50% con a) 0N aplicados y b) 500N aplicados.....	88
Figura 61. Resultado de la sensibilidad en un $\Delta\lambda$ del sensor de FOP con desbaste cilíndrico al a) 30% y b) 50%.....	90

Índice de Tablas

Tabla 1. Índice de refracción de diferentes medios.....	21
Tabla 2. Resumen de ventajas y desventajas de la FOP.....	25
Tabla 3. Longitud de onda en las fuentes de luz.....	26
Tabla 4. Datos obtenidos en la caracterización del acoplador de FOP 2x2-50/50.....	47
Tabla 5. Respuesta del lazo sin desbaste en los extremos del espectro láser.....	66
Tabla 6. Resultado del desplazamiento lateral del espectro en el intervalo (0-500) N.....	67
Tabla 7. Respuesta del lazo con desbaste al 30% en los extremos del espectro láser.....	69
Tabla 8. Resultado del desplazamiento lateral del espectro del lazo al 30% de desbaste.....	69
Tabla 9. Respuesta del lazo en D con desbaste al 50% en los extremos del espectro láser.	71
Tabla 10. Respuesta del lazo en D con desbaste al 50% en los extremos del espectro láser.	72

Tabla 11. Respuesta del lazo en V con desbaste al 30% en los extremos del espectro láser.	79
Tabla 12. Resultado del desplazamiento lateral del espectro del lazo al 30% de desbaste.....	79
Tabla 13. Respuesta del lazo en V con desbaste al 50% en los extremos del espectro láser.	81
Tabla 14. Resultado del desplazamiento lateral del espectro del lazo al 50% de desbaste.....	81
Tabla 15. Respuesta del lazo con desbaste cilíndrico al 30% en los extremos del espectro láser.....	85
Tabla 16. Resultado del desplazamiento lateral del espectro del lazo al 30% de desbaste.....	85
Tabla 17. Respuesta del lazo con desbaste cilíndrico al 50% en los extremos del espectro láser.....	87
Tabla 18. Resultado del desplazamiento lateral del espectro del lazo al 50% de desbaste cilíndrico.....	87
Tabla 19. Resumen de resultados de acuerdo con las diferentes pruebas realizadas con los lazos de FOP.....	91

Capítulo 1

I. Introducción.

1.1 Antecedentes.

1.2 Los sensores de fibra óptica.

Las fibras ópticas de polímero o plástico (POF) son fibras multimodo de gran diámetro, flexibles, de bajo costo y duraderas hechas de una variedad de tipos de plástico, como el poliestireno, el policarbonato, y los materiales perfluorados. En comparación con las fibras ópticas de sílice, los POF tienen otros beneficios. Estos incluyen una fácil fabricación y operación, un bajo costo, alta flexibilidad, suavidad, peso ligero, mayor resistencia a la fractura, mayores límites de tensión y biocompatibilidad. Los POF son una tecnología apropiada para aplicaciones como sensores de redes de área local y la fabricación de dispositivos como fibras ópticas adelgazadas (tapers), conectores, acopladores, rejillas e incluso sistemas interferométricos debido a sus características [1].

En el campo industrial, la medición de variables tanto físicas como químicas es muy importante porque podemos encontrar una gran cantidad de dispositivos que requieren acciones mecánicas o señales eléctricas para funcionar. Se pueden encontrar varios medidores, incluyendo temperatura, fuerza, presión, peso, nivel y humedad. Algunos de ellos llegan a ser costosos debido a sus características de diseño en el material de fabricación, precisión en la medición, etc. Las propiedades de la fibra óptica, como pequeña, ligera, resistente a altas temperaturas, presión y electromagnéticamente pasiva son las principales responsables de estos beneficios. La detección se logra mediante el análisis de las propiedades de la luz para obtener medidas

como nivel, presión y temperatura. Esto permite desarrollar soluciones de monitoreo versátiles para una variedad de aplicaciones, como monitoreo periódico a grandes distancias en condiciones extremas o entornos peligrosos, dentro de estructuras y motores, y para monitoreo y asistencia en la salud. Los sensores de fibra óptica tienen muchos beneficios en comparación con otros tipos de sensores [2].

A finales del 2017 Sartiano, D. y Sales, S. [3], informaron sobre el diseño y la aplicación práctica de un sensor de fibra integrado en un colchón para la detección de apnea del sueño y en general para la monitorización cardio pulmonar no invasiva (procedimiento no invasivo: no involucra instrumentos que rompen la piel o que penetra físicamente en el cuerpo). El sensor se implementó con componentes electrónicos estándar para la comunicación óptica de fibra de plástico, un Arduino, y POF industriales, que estaban preparados para detectar presión, utilizando un método sencillo y repetible que podía reproducirse fácilmente en un proceso de producción a gran escala. El rendimiento obtenido demuestra la viabilidad del sensor para detectar movimientos y respiración. Durante los ciclos respiratorios, la fuerza transmitida de los pulmones al tórax está en el orden de decenas de Newtons, y la frecuencia de respiración es de una respiración cada 2-5 s (0.2-0.5 Hz). Las mediciones estáticas muestran una buena linealidad (valores R^2 - 97,40%) y una resolución de fuerza aplicada en un solo punto de 2.2-4.5%/N en la salida de tensión normalizada. El sensor tiene una respuesta de 3 dB para una frecuencia inferior a 10 Hz y sin deriva debido a los ciclos de carga.

En el 2020 Daulet Baimukashev et al. [4], presentó un sensor táctil óptico que incorpora fibras ópticas de plástico, caucho de silicona transparente y una cámara a color que detecta: fuerzas de corte traslacionales y rotacionales, y la ubicación del contacto y su fuerza normal. La localización del contacto es posible gracias a la deformación por corte. Una de las capas se estira de modo que su espesor disminuye. La disminución del espesor da como resultado el cambio de color en el punto de contacto. El comportamiento elástico de los medios de detección proporciona un mecanismo robusto de detección de corte rotacional y traslacional cuando se aplican torque y fuerza plana, respectivamente, sobre la superficie de detección. Con una fuerza normal mínima de 0.62N y una fuerza cortante mínima de 0.33N, con una torsión mínima de 0.005 Nm y un rango dinámico de torsión de 5 mNm a 150 mNm. El sensor muestra un rango dinámico de fuerza normal de 0.62N a 8N y un rango dinámico de fuerza cortante de 0.33 a 10N en un ancho de banda de alrededor de 4Hz.

En 2021 A. Arifin et al. [5], propuso sensores de fibra óptica plástica (POF) para hormigón, con ensayos de compresión y tracción. La estructura del sensor está compuesta de fibras ópticas plásticas FOP sin capa adherida a las superficies del hormigón. Se obtuvieron valores de sensibilidad y resolución en el ensayo de resistencia a compresión del concreto de 0.085 voltios/kN y 0,047 kN. Mientras que el valor de sensibilidad y resolución del ensayo de tracción del hormigón obtenido fue de 0,082 voltios/kN y 0,048 kN. El sensor tiene la ventaja que es de bajo costo y simple para monitorear el estado de la estructura del edificio.

En el 2022 Sahar Safarloo et al. [6], expuso un sensor de fibra óptica de plástico (FOP) para detectar la fuerza aplicada por el pie humano y medir el patrón de marcha. El sensor de curvatura de FOP se basa en la intensidad para detectar la fuerza aplicada por el pie humano y medir el patrón de la marcha. Con la macrocurvatura de la fibra óptica plástica FOP para mediciones estáticas y dinámicas fue probado en un rango de fuerza de 0-2KN en la frecuencia más alta de 3Hz. Los resultados se compararon con la de dos sensores de fuerza comerciales diferentes, incluyendo sensores piezorresistivos y una plataforma de fuerza clínica. También se sugiere que el sensor de FOP se puede utilizar en una amplia gama de aplicaciones, dado su bajo costo y naturaleza no invasiva.

A principios del 2022 Pham Thanh Binh et al. [7], propone un nuevo refractómetro de fibra óptica que utiliza una estructura láser de fibra óptica de espejo de bucle integrada con una rejilla de Bragg (FBG) en forma de D como sonda de detección con una gran ventaja en la detección, así como una alta intensidad y un ancho de línea espectral estrecho de la respuesta de la señal de detección, y el límite de detección (LOD) mejorado. El sensor propuesto se demodula mediante cambio de longitud de onda. La respuesta espectral láser de el sensor se obtiene a alta intensidad y se mantiene estable aplicando la técnica de bomba saturada. La FBG en forma de D que funciona como sonda sensora es adecuado para sensores bioquímicos. La viabilidad del sensor propuesto se investiga cuando el índice de refracción (RI) del medio cambia de 1.42 a 1.44 y el sensor muestra una sensibilidad y LOD de 33.94 nm/RIU y 2.95×10^{-4} RIU (unidad de índice de refracción), respectivamente. Estas características mejoradas de este sensor hacen que el sensor propuesto sea prometedor para diversas aplicaciones, especialmente para el monitoreo de contaminantes químicos en ambientes acuosos.

A finales del 2022 A. Ghaffar et al. [8], proponen un sensor de fuerza basado en la variación de intensidad para la fibra óptica de plástico (FOP) que se basa en la estructura de torsión. Los

resultados de detección del sensor se basan en el modo de revestimiento frustrado de reflexión interna total (CMFTIR). En el centro, una porción de dos fibras ópticas de plástico se retuerce, donde la fuente de luz y la fibra iluminadora están conectadas, y el medidor de potencia está conectado al extremo delantero de la segunda fibra. Por lo tanto, se mide la fuerza de la segunda fibra observando la variación de intensidad acoplada, donde se aplica una fuerza de hasta 0-20 N. El sensor se examina en fibras rectas, retorcidas con curvas y sin curvas según su sensibilidad. Los hallazgos de los experimentos indican que el sensor tiene una mayor sensibilidad en la estructura retorcida con la curva, y que el radio de flexión también tiene un impacto en la sensibilidad del sensor. Un sensor de fuerza multipunto también está disponible. Para la detección de múltiples puntos, la fibra óptica se retuerce (FOP) se retuerce hasta 100 centímetros y se aplica fuerza en cinco puntos distintos. Para la respuesta individual de cada eje, se utiliza un esquema en cascada. Este trabajo ofrece una manera diferente de medir la fuerza basada en cambios de intensidad y tiene una ventaja adicional de ser más barato que los sistemas de rejillas de fibra Bragg.

En el 2023 N. Cennamo et al. [9], simuló, fabricó y probó experimentalmente un sistema de sensores de fuerza optimizado. Se basa en una fibra óptica de plástico (FOP) modificada unida en la parte trasera de un voladizo de acero (Un voladizo es una estructura arquitectónica como una viga que se proyecta hacia afuera de un edificio o una pared). La FOP se modifica oportunamente con varias muescas con el fin de mejorar el rendimiento del sistema de sensores. Posteriormente, se realizó un análisis experimental para caracterizar el sensor fijando un extremo del voladizo y aplicando fuerzas transversales en el extremo sin restricciones, con diferentes pesos. Se realizaron varias pruebas preliminares de optimización para establecer la mejor condición de trabajo en términos de fuentes de luz y parámetros de muescas, es decir, profundidad y periodicidad. De acuerdo con los resultados del experimento, el sistema de sensor de fuerza sugerido muestra una linealidad muy buena en el rango de 50 a 300 mN, con una sensibilidad de 110.34 mV/N y una resolución de 5mN.

En marzo de 2024 Mora Núñez et al. [1], demostraron la eficacia de un filtro espectral en el visible basado en una fibra óptica de plástico con micro orificios como un filtro espectral de bajo costo, robusto y altamente reproducible. El filtro espectral se explora para dos configuraciones: una fibra extendida en línea recta y una configuración de espejo de bucle de fibra óptica. Los rastros de transmisión indican un cambio azul espectral en la transmisión pico, a 587 nm, 567 nm, 556 nm y 536 nm para cero, uno, dos y tres agujeros en la fibra, respectivamente. La configuración del

espejo de bucle de fibra mejora aún más la sensibilidad de tales sensores utilizando fibras ópticas de plástico (FOP) perforadas.

En este estudio se plantea la creación y análisis de un sensor de fuerza basado en un lazo de fibra óptica plástica desbastada. El propósito es alterar la estructura diametral y la sensibilidad de la fibra mediante la fuerza. Se utilizará una fuente de luz de 632nm para su análisis y se aplicará fuerza gradualmente en un rango de 0 a 500N, con el fin de obtener la sensibilidad a la fuerza a través de la modulación del ancho del pulso del espectro. Con la creación de este sensor, se abre la posibilidad de utilizarlo en la medición de fuerzas.

1.3 Justificación.

Los sensores de fuerza de fibra óptica representan una tecnología innovadora para la medición automatizada que son fundamentales en la construcción y el funcionamiento de muchas estructuras de ingeniería civil [10], en la medicina como en la detección de peso, de fuerza en microcirugía de retina [11], también en intervención del procedimiento de cateterismo [12], en la industria textil para la monitorización de variables físicas como la presión en la persona [13], en la resonancia magnética y rehabilitación. Con el objetivo de mejorar la seguridad, la precisión, la eficacia y el resultado en procesos que dependen de esta variable física [14].

El diseño y desarrollo de sensores de fibra óptica plástica es de suma importancia debido a la reducción de costos que conlleva. Además, el uso del lazo en fibra óptica de plástico como sensor de fuerza ha sido poco explorado. En comparación con las fibras convencionales, la fabricación y caracterización de estos dispositivos requiere de equipos voluminosos y costosos los cuales no siempre están disponibles en los laboratorios de sensores ópticos. Por otro lado, los espejos de lazo óptico no lineales con fibras ultradelgadas o estructuras especiales, aunque son utilizados como sensores ópticos, también tienen un costo elevado [15-16].

Trabajar con fibra de plástico presenta varias ventajas, ya que se puede utilizar para fabricar sensores o dispositivos ópticos de corto alcance sin que sus propiedades ópticas se degraden, incluso a distancias de hasta 100 metros. Además, se pueden utilizar LEDs como fuentes de luz, analizadores de espectros y medidores de potencia en el espectro visible, que son más económicos en comparación con otros equipos de espectro extendido. Los dispositivos de polimetilmetacrilato (PMMA) o plástico son compactos, flexibles y pueden funcionar en una

amplia gama de longitudes de onda. Dependiendo de los componentes del plástico y el método de fabricación, los dispositivos de fibra óptica plástica (FOP) son sensibles a diferentes parámetros físicos como temperatura, tensión y presión. Esto tiene aplicaciones beneficiosas y puede reducir los costos del sensor óptico de diversas variables físicas tanto en la industria como en diferentes áreas de la ciencia [17-18].

Además, se ha observado un escaso avance en el desarrollo de sensores de fuerza de fibra óptica plástica (FOP) con un lazo de fibra óptica plástica, donde se interconecta básicamente otro interferómetro Fabry-Perot en cascada al arreglo experimental, lo que resulta en un dispositivo altamente sensible a la presión y otros parámetros [19]. Es evidente que existe una mayor cantidad de información disponible para este tipo de sensores fabricados con fibras convencionales y especiales de vidrio [20-28]. El interés por obtener un sensor de fuerza de fibra óptica plástica es relevante debido a su posible utilidad en mecanismos y dispositivos de fuerza en el sector industrial, comercial y otras áreas de la ciencia y tecnología a nivel mundial, sin dejar de mencionar los beneficios en las líneas de investigación relacionadas con este tipo de fibra óptica plástica. Por tales motivos, la presente investigación se centra en obtener un sensor para la medición de fuerza que es una variable importante ya sea para el control, supervisión e incluso para el funcionamiento de otros dispositivos en la industria.

1.4 Hipótesis

El lazo de fibra óptica plástica como un sensor de fuerza tiene una mejor sensibilidad en nm/N cuando se fabrica con un desbaste diametral en un espectro de <1200nm.

1.5 Objetivo general.

Desarrollar un sensor de fuerza con un lazo de fibra óptica plástica para caracterizar su sensibilidad en nm/N.

1.6 Objetivos específicos

1. Caracterizar un acoplador de fibra óptica de plástico (FOP) 50/50 en un espectro de $<1200\text{nm}$.
2. Modificar el diámetro de las FOP desbastando una longitud de menos de 5cm.
3. Analizar la sensibilidad a la fuerza en (nm/N).

1.7 Organización de la tesis.

El propósito de este apartado es comprender el impacto de esta investigación de forma clara, rápida y precisa. La información se encuentra organizada de la siguiente manera:

CAPITULO 1: Introducción

Se describen los antecedentes fundamentados para realizar sensores de fuerza en fibra óptica plástica (FOP) con un lazo de FOP los cuales se han desarrollado y han sido citados en distintos trabajos llevados a la práctica con sus respectivas aplicaciones y contribuciones por grupos científicos de la misma área de estudio. Además, contiene la justificación del proyecto de investigación, los objetivos generales y específicos, así como la organización de la tesis.

CAPITULO 2: Marco teórico.

Este capítulo contiene los principales conceptos para comprender las fibras ópticas convencionales y las fibras ópticas de plástico. Además, se describen sus principales características. También se describe al polarizador óptico, el acoplador de fibra óptica de plástico y finalmente los tipos de sensores de fibra óptica de plástico.

CAPITULO 3: Metodología.

Este capítulo presenta los métodos utilizados para el desarrollo del trabajo de investigación con la teoría estudiada de fibras ópticas plásticas utilizadas como lazo de FOP para realizar sensores de fuerza con un acoplador óptico de FOP. Además, se muestra la caracterización de varias FOP de diferente diámetro aplicándoles fuerza mecánica con el fin de encontrar valores máximos que causen fractura a la FOP o daño permanente, además de observar los cambios en la intensidad de la luz láser. Con estos cambios se caracteriza un acoplador óptico 50:50, 2X2 con un espectro de luz menor a 1200nm, esto para verificar su factor de acoplamiento con longitud de onda menor a 1200nm. Después de estas actividades, se empalmó fibra óptica plástica (FOP) con desbaste en los extremos del acoplador óptico, con la finalidad de obtener sensibilidad o detección a la variación de fuerza aplicada sobre el lazo en nm/N.

CAPITULO 4: Resultados.

Se muestran los resultados obtenidos en intensidad y la sensibilidad del lazo de FOP con la modulación del ancho del pulso inducido por la fuerza aplicada en una sección de la FOP con diferentes tipos de desbaste.

CAPITULO 5: Conclusiones.

En primer lugar, se exponen las conclusiones generales obtenidas a partir de la investigación realizada, las cuales brindan una visión global de los resultados obtenidos. A continuación, se analiza la implicación de estos resultados, destacando su relevancia y su impacto en el campo de estudio correspondiente. Asimismo, se resaltan las contribuciones significativas que esta investigación ha realizado, aportando nuevos conocimientos y perspectivas al tema abordado. Además, también se mencionan las limitaciones encontradas durante el desarrollo del estudio, reconociendo las posibles áreas de mejora y los aspectos que podrían haber influido en los resultados. Por último, se ofrecen recomendaciones para futuros trabajos, con el objetivo de continuar avanzando en la investigación y abordar las áreas que aún requieren mayor atención y estudio.

Referencias.

- [1] Mora-Nuñez, A., Santiago-Hernández, H., Bravo-Medina, B., Beltran-Gonzalez, A., Flores-Payán, J., de la Cruz-González, J. L., & Pottiez, O. (2024, March). Plastic Optical Fiber Spectral Filter Based on In-Line Holes. In *Photonics* (Vol. 11, No. 4, p. 306)
- [2] Pendão, C., & Silva, I. (2022). Optical fiber sensors and sensing networks: overview of the main principles and applications. *Sensors*, 22(19), 7554.
- [3] Sartiano, D., & Sales, S. (2017). Low cost plastic optical fiber pressure sensor embedded in mattress for vital signal monitoring. *Sensors*, 17(12), 2900.
- [4] Baimukashev, D., Kappasov, Z., & Varol, H. A. (2020). Shear, torsion and pressure tactile sensor via plastic optofiber guided imaging. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 2618-2625.
- [5] Arifin, A., Rusyam, N. I., Lebang, A. K., Abdullah, B., & Tahir, D. (2021). High sensitivity and resolution sensor plastic optical fiber for determining compressive and tensile tensor concrete applications. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1763, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- [6] Safarloo, S., Núñez-Cascajero, A., Sanchez-Gomez, R., & Vázquez, C. (2022). Polymer optical fiber plantar pressure sensors: Design and validation. *Sensors*, 22(10), 3883.
- [7] BINH, P. T., VAN, N. T., VAN HOI, P. H. A. M., HUY, B., CAM, H. T. H., DO THUY, C. H. I., & TUAN, N. A. (2022). Highly-sensitive Refractometer Based on a D-shaped Fiber Bragg Grating Integrated into A Loop-mirror Optical Fiber Laser. *Communications in Physics*, 32(1), 11-20.

- [8] Ghaffar, A., Li, Q., Mehdi, M., Hussain, S., Jia, Y. M., Onyekwena, C. C., & Ali, N. (2022). Analysis of force sensor using polymer optical fiber based on twisting structure. *IEEE Sensors Journal*, 22(24), 23960-23967.
- [9] Cennamo, N., Arcadio, F., Andò, B., Marletta, V., Del Prete, D., Cesaro, M., & Zeni, L. (2023). Optimization of a force sensor realized by modified plastic optical fibers integral with a cantilever. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
- [10] Yao, Y., Yan, M., & Bao, Y. (2021). Measurement of cable forces for automated monitoring of engineering structures using fiber optic sensors: A review. *Automation in Construction*, 126, 103687.
- [11] Iordachita, I., Sun, Z., Balicki, M., Kang, J. U., Phee, S. J., Handa, J., & Taylor, R. (2009). A sub-millimetric, 0.25 mN resolution fully integrated fiber-optic force-sensing tool for retinal microsurgery. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 4, 383-390.
- [12] Polygerinos, P., Zbyszewski, D., Schaeffter, T., Razavi, R., Seneviratne, L. D., & Althoefer, K. (2010). MRI-compatible fiber-optic force sensors for catheterization procedures. *IEEE Sensors Journal*, 10(10), 1598-1608.
- [13] Rothmaier, M., Luong, M. P., & Clemens, F. (2008). Textile pressure sensor made of flexible plastic optical fibers. *Sensors*, 8(7), 4318-4329.
- [14] Su, H., Iordachita, I. I., Tokuda, J., Hata, N., Liu, X., Seifabadi, R., & Fischer, G. S. (2017). Fiber-optic force sensors for MRI-guided interventions and rehabilitation: A review. *IEEE sensors journal*, 17(7), 1952-1963.
- [15] Kuczkowski, M., Ying, C., Dinh, X. Q., Shum, P. P., Rutkowska, K. A., & Woliński, T. R. (2012). Microfiber Sagnac Interferometer for sensing applications. *Photonics Letters of Poland*, 4(4), 134-136.

- [16] Reyes-Vera, E., Cordeiro, C. M., & Torres, P. (2017). Highly sensitive temperature sensor using a Sagnac loop interferometer based on a side-hole photonic crystal fiber filled with metal. *Applied optics*, *56*(2), 156-162.
- [17] Peters, K. (2010). Polymer optical fiber sensors—a review. *Smart materials and structures*, *20*(1), 013002.
- [18] Oliveira, R., Marques, T. H., Bilro, L., Nogueira, R., & Cordeiro, C. M. (2017). Multiparameter POF sensing based on multimode interference and fiber Bragg grating. *Journal of lightwave technology*, *35*(1), 3-9.
- [19] Sequeira, F., Cennamo, N., Rudnitskaya, A., Nogueira, R., Zeni, L., & Bilro, L. (2019). D-shaped POF sensors for refractive index sensing—The importance of surface roughness. *Sensors*, *19*(11), 2476.
- [20] Al-Mai, O., Ahmadi, M., & Albert, J. (2017). A compliant 3-axis fiber-optic force sensor for biomechanical measurement. *IEEE Sensors Journal*, *17*(20), 6549-6557.
- [21] Zarrin, P. S., Escoto, A., Xu, R., Patel, R. V., Naish, M. D., & Trejos, A. L. (2017, May). Development of an optical fiber-based sensor for grasping and axial force sensing. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 939-944). IEEE.
- [22] Ulgen, N. O., Uzun, D., & Kocaturk, O. (2018). Phantom study of a fiber optic force sensor design for biopsy needles under MRI. *Biomedical optics express*, *10*(1), 242-251.
- [23] Pevec, S., & Donlagic, D. (2020). Miniature all-fiber force sensor. *Optics Letters*, *45*(18), 5093-5096.
- [24] Bandari, N., Dargahi, J., & Packirisamy, M. (2020). Image-based optical-fiber force sensor for minimally invasive surgery with ex-vivo validation. *Journal of The Electrochemical Society*, *167*(12), 127504.

- [25] Deng, Y., Yang, T., Dai, S., & Song, G. (2020). A miniature triaxial fiber optic force sensor for flexible ureteroscopy. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 68(8), 2339-2347.
- [26] Deng, Y., Yang, T., Lou, B., Yu, K., Song, G., & Dai, S. (2022). A sensitivity difference approach to overcome temperature influence on a fiber optic force sensor with a pair of FBGs. *Sensors and Actuators A: Physical*, 342, 113645.
- [27] Lai, W., Cao, L., Liu, J., Tjin, S. C., & Phee, S. J. (2021). A three-axial force sensor based on fiber Bragg gratings for surgical robots. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 27(2), 777-789.
- [28] Lee, S., Kim, J. I., Baek, Y., Chang, D., Lee, J., Park, Y. S., & Park, Y. L. (2024). Fiber-Optic Force Sensing of Modular Robotic Skin for Remote and Autonomous Robot Control. *IEEE Transactions on Robotics*.

Capítulo 2

Resumen.

En este capítulo se exhiben los conceptos básicos para entender las fibras ópticas, los tipos de fibras que hay, las fibras ópticas de plástico (FOP) con sus ventajas y desventajas, las fuentes de luz que se utilizan para las FOP, sus aplicaciones militares y en la industria, además de otros instrumentos como el polarizador óptico y el acoplador que hacen equipo para la fabricación de sensores de FOP. Finalmente se describen la clasificación y modulación de los sensores de fibra óptica.

II. Marco Teórico.

2.1 La Fibra Óptica de Plástico (FOP).

2.1.1 La fibra óptica.

Para transmitir datos, la fibra óptica, una guía de onda en forma de cilindro, es muy transparente. El núcleo, que es el interior de la fibra óptica por donde se emite la onda de luz, y el revestimiento, que es el exterior de la fibra óptica con un índice de refracción menor que el núcleo, reflejan la luz hacia el centro de la fibra óptica para que permanezca en el núcleo, como se muestra en la Figura 1. Para proteger y mantener la estabilidad mecánica de la fibra óptica, el núcleo y el revestimiento se aíslan por un material plástico conocido como forro o cubierta (diámetro de $250 \mu m$) [1-9].

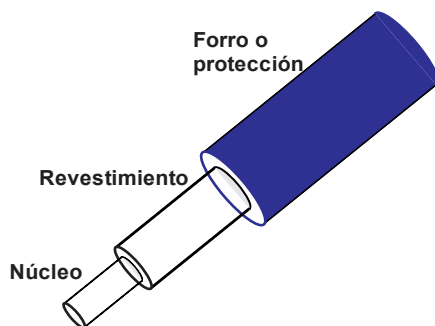


Figura 1. Partes de la fibra óptica.

2.1.2 Tipos de fibra óptica por el material en el núcleo y revestimiento.

Como se muestra en la figura 2, las fibras ópticas se clasifican en tres tipos diferentes según el material que constituye el núcleo y el revestimiento.

Dado que tienen una menor atenuación y una mejor propagación de información, las fibras ópticas de núcleo y el revestimiento de vidrio son los más destacados. Son débiles mecánicamente y más susceptibles a los incrementos de atenuación. Por otro lado, el revestimiento de plástico y las fibras de núcleo de sílice son menos sensibles a la radiación y tienen una baja atenuación. Finalmente, las fibras ópticas de núcleo y revestimiento de plástico son más resistentes, transportables, ligeras y económicas, pero tienen una alta atenuación.

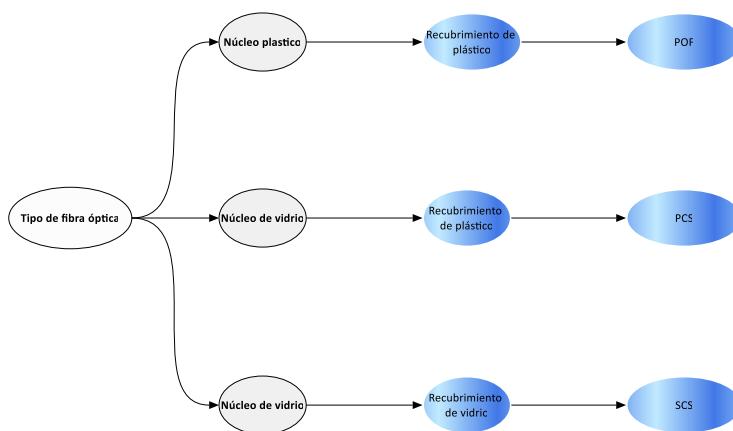


Figura 2. Clasificación de la fibra óptica por el tipo de material.

2.1.3 Categorización de fibras ópticas de acuerdo con el modo de propagación.

La fibra óptica se clasifica en dos categorías según el modo de propagación utilizado en las comunicaciones.

- a) La fibra óptica monomodo tiene un modo de propagación a través del núcleo, lo que significa que la fibra puede guiar y transmitir un solo rayo de luz a través de su núcleo muy pequeño con un diámetro de 8 a 10 μm . Esto permite que el rayo sea paralelo al eje de la fibra y evita el desfase en el final de la transmisión. Sin embargo, se requiere un ensamble muy cerrado y preciso. Esta fibra tiene una atenuación de (0.1 – 0.4) dB/Km . Debido a sus características, puede usarse para transmitir información a largas distancias con velocidades de (10 a 40) Gbs o más.

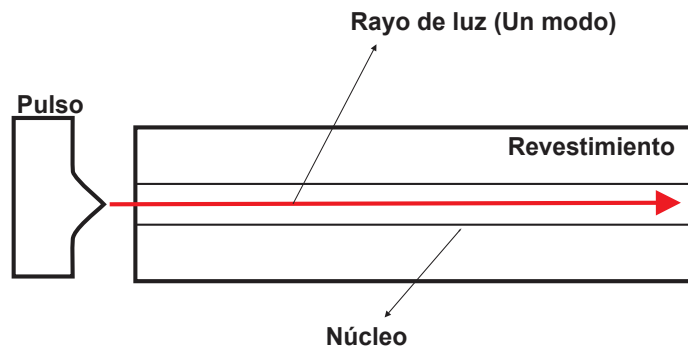


Figura 3. Propagación de un haz de luz en la fibra óptica monomodo.

- b) La fibra óptica multimodo tiene varios modos de propagación de luz o puede transmitir múltiples rayos de luz a través de su núcleo con diámetros de (50 a 200) μm , lo que facilita su acoplamiento de luz. Las atenuaciones de este tipo de fibra oscilan entre 0.3 y 1 dB/Km . Las características de las fibras multimodo permiten la conexión, el mantenimiento y el uso de fuentes de luz como los LED (Diodo Emisor de Luz) a un costo menor que las fibras monomodo [10].

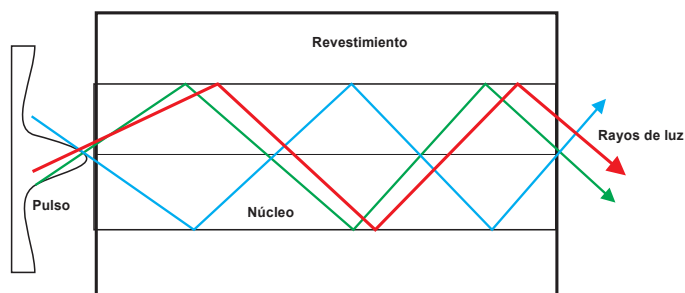


Figura 4. Varios rayos de luz en una fibra óptica multimodo.

Los dos tipos de fibra óptica multimodo, dependen del índice de refracción de la fibra óptica, por lo que hay fibras multimodo de índice fijo y de índice gradual. La fibra multimodo de índice gradual es utilizada para compensar las diferentes longitudes de trayectoria de los modos, esto se debe a las variaciones en la composición del vidrio en el núcleo. En la fibra óptica multimodo de índice fijo la propagación del haz de luz es muy lenta, debido a la dispersión causada por las diferentes longitudes de trayectoria de los distintos modos [11].

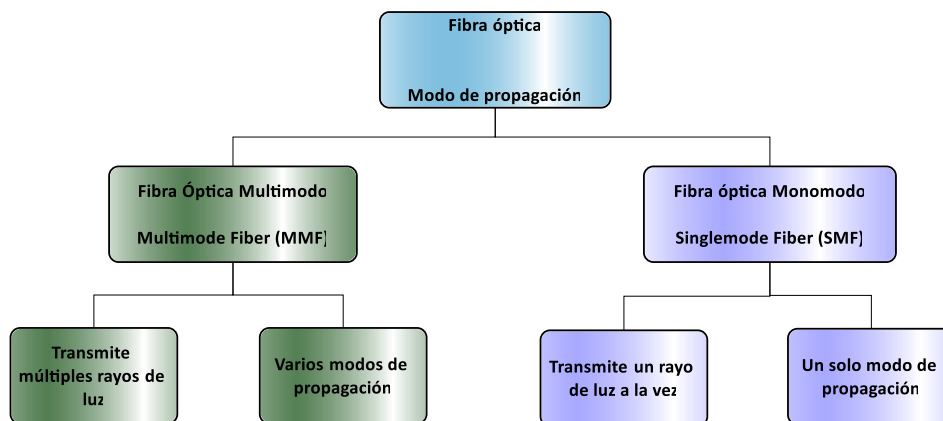


Figura 5. Fibra óptica de acuerdo con el modo de propagación de la luz.

2.2 Características de la luz.

Se define la luz como una onda electromagnética que posee dos cualidades la longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν), la luz se encuentre dentro del espectro electromagnético mostrado en la

figura 6. La radiación electromagnética corresponde a ondas electromagnéticas que constan de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que son mutuamente perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Las siguientes son las características principales de las ondas electromagnéticas: (1) No requieren un medio para propagarse, pueden propagarse a través del vacío o cualquier otro medio. (2) Se extienden en todas las tres direcciones del espacio, lo que los hace tridimensionales. (3) Son transversales, lo que significa que la perturbación ocurre perpendicularmente a la dirección de propagación.

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias posibles a las que se produce la radiación electromagnética.

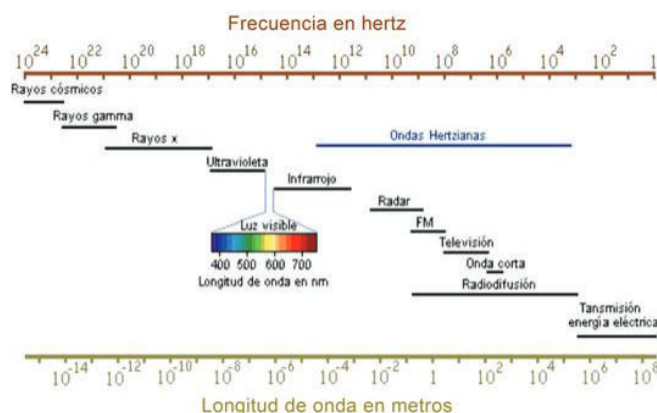


Figura 6. Espectro electromagnético [12].

La longitud de onda es la distancia entre dos valores de amplitud máxima de la onda, medida en centímetros, metros o Armstrong. La frecuencia, expresada en hertz (Hz), es el número de repeticiones de una onda por unidad de tiempo.

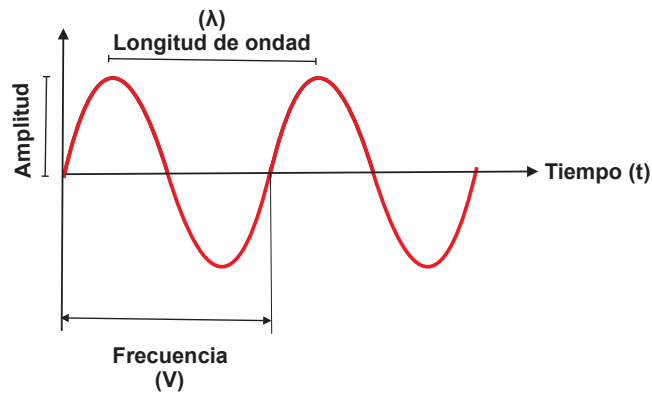


Figura 7. Características de una onda.

Las tres formas en que un rayo de luz interactúa con una superficie son reflejada, transmitida y absorbida. En ocasiones, pueden aparecer combinaciones de dos o hasta tres tipos. El efecto de la refracción se observa introduciendo una varilla en agua, se puede percibir que la varilla parece quebrarse bajo la superficie, lo que pasa es que la luz reflejada por la varilla su forma cambia de dirección fuera del agua, esto se debe a la diferencia de índices de refracción entre el agua y el aire. El fenómeno puede observarse en un espejo donde la mayor parte de la luz no puede atravesar el material y se refleja al medio anterior [13-14].

2.2.1 Reflexión y refracción de la luz.

Las ondas de luz se reflejan y transmiten cuando pasan por el interior de la fibra óptica. Estos cambios en la refracción y la reflexión de la luz varían según el material y la incidencia de la luz.

La mayoría de las veces, cuando un rayo de luz entra en una superficie entre dos materiales transparentes, la luz se refleja y se refracta (transmite) hacia el segundo medio, como se muestra en la Figura 8. El rayo se desvía de la perpendicular si el segundo medio tiene un índice de refracción mayor que el primero. Esto se debe a que $n_1 > n_2$ y el ángulo de refracción es mayor que el ángulo de incidencia $\theta_2 > \theta_1$.

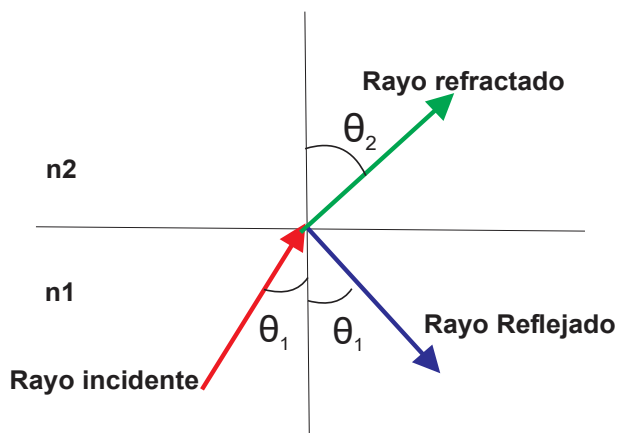


Figura 8. Rayo de luz incidente reflejado y refractado entre dos medios.

El ángulo de refracción θ_2 aumenta al incrementar el ángulo de incidencia θ_1 , y el ángulo más grande que θ_2 puede ser de 90° , como se muestra en la figura 8. El ángulo de incidencia θ_1 , que da como resultado un ángulo de refracción de 90° , es el ángulo crítico θ_c para una combinación de materiales.

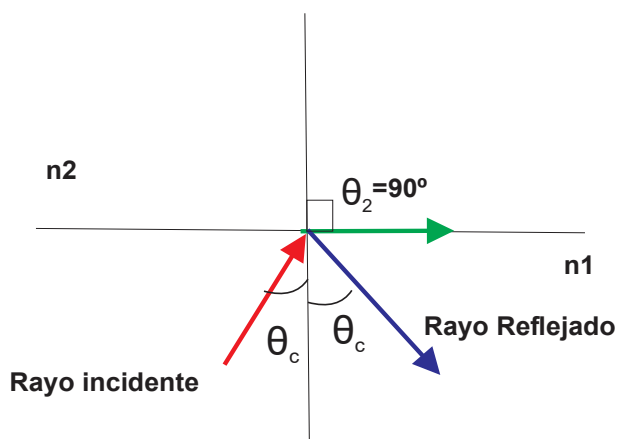


Figura 9. Representación del ángulo crítico.

La reflexión interna total solo ocurre cuando un rayo de luz incide desde un material con un índice de refracción alto a un material con un índice de refracción bajo. Esta condición ocurre cuando el ángulo de incidencia θ_1 es mayor que el ángulo crítico, como se muestra en la figura 10. La propagación de los rayos de luz a través del núcleo y revestimiento de la fibra óptica depende de esta condición.

Como se muestra en la figura 10, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia debido a la ley de reflexión. Esto se debe al hecho de que los rayos incidente, reflejado y refractado se encuentran en el mismo plano [15].

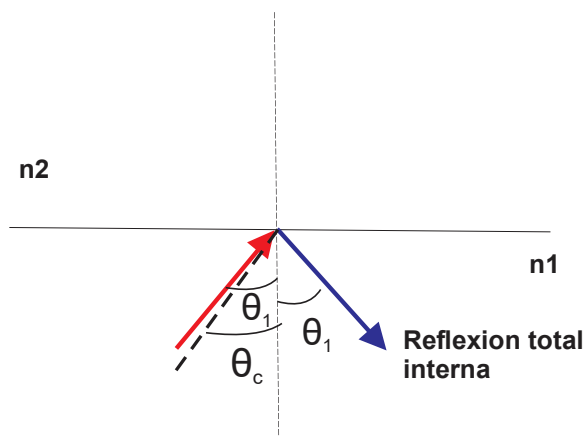


Figura 10. Reflexión total interna.

2.2.2 Ley de Snell.

Una de las leyes de la reflexión dice que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia para todas las longitudes de onda y para cualquier material, esta relación se conoce como ley de reflexión. La razón de los senos de los ángulos θ_1 y θ_2 , donde los dos ángulos están medidos a partir de la normal a la superficie, es igual al inverso de la razón de los índices de refracción, a esto se le conoce como ley de Snell y establece que la refracción de un rayo de luz en una interfaz es el resultado de la diferencia de velocidad de la luz en dos materiales que tienen diferentes índices de refracción.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

Donde el índice de refracción (n) de un medio es la relación entre velocidad de la luz en el vacío $c = (2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s})$ y la velocidad de la luz en el medio (v):

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

El índice de refracción es un constante del medio y en el vacío tiene un valor de $n = 1$. En la siguiente tabla se muestran los valores de algunos índices de refracción de diferentes materiales.

Tabla 1. Índice de refracción de diferentes medios.

Sustancia	Índice de refracción (n)
Vacío	1.0000
Aire	1.00029
Agua (0-20°C)	1.333
Acrílico	1.49

2.2.3 Apertura numérica.

La apertura numérica (NA) de una fibra óptica es la capacidad de capturar la luz, cuanto mayor sea la magnitud de la NA , más luz captará el núcleo de la fibra óptica de la fuente externa. Esto se muestra en la figura 11 [16].

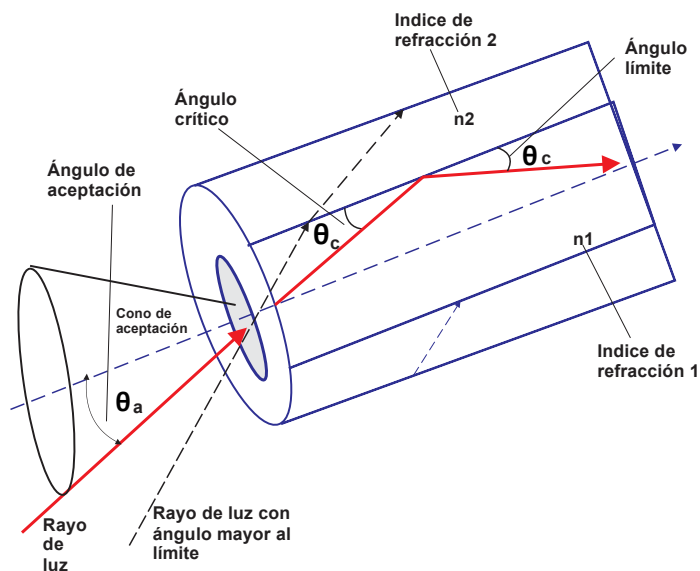


Figura 11. Apertura numérica en la fibra óptica.

El máximo ángulo de acoplamiento se denomina ángulo de aceptación del conductor de fibra óptica y es únicamente función de los índices de refracción (n), como se observa en la ecuación 3.

$$\sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3)$$

2.3 Fibra óptica de plástico.

Antes de las fibras ópticas de vidrio, que destacaban por sus características y propiedades que presentaban más ventajas que las fibras ópticas de plástico, las fibras ópticas de plástico (FOP) ya habían aparecido en 1960. En la figura 12 se compara el diámetro del núcleo de la fibra de vidrio con el diámetro del núcleo de varias fibras de plástico.



Figura 12. Comparación del núcleo de vidrio con el núcleo de las FOP.

Las FOP actuales compiten con las fibras ópticas de vidrio a medida que avanza la tecnología y se requieren nuevas aplicaciones. Las fibras ópticas de plástico se fabrican a partir de materiales como poliestireno, policarbonato y polimetilmetacrilato (PMMA). Los PMMA tienen una buena respuesta en el espectro electromagnético visible dentro del intervalo de longitud de onda de 520 a 780nm , pero tienen un problema con las pérdidas a grandes distancias, por lo que se utilizan en diversas e importantes aplicaciones a cortas distancias.

El progreso de las FOP se comienza en el año 1960 cuando Pilot Chemical de Boston reportó el uso de la fibra óptica de plástico mediante polimetilmetacrilato, que a finales de esa misma

década Du Pont lo mejora y decide por venderlo a Mitsubishi Rayon de Japón, En esos años la FOP presentaba pérdidas de 1000 dB/Km . En los años posteriores Misubishi perfecciona la FOP con PMMA obteniendo pérdidas de 150 dB/Km en 650 nm de longitud de onda. Estas fibras ópticas de plástico tenían un índice escalonado y un ancho de banda de 50 Mb/s en 100m de fibra. Koike de la Universidad de Keio creó fibra plástica con índice gradual de PMMA (GI POF) en 1990. Tiene un ancho de banda de 3 Gb/s y una longitud de onda de 650nm con pérdidas de 150 dB/Km .

Koike logró una disminución significativa en las perdidas por 50dB/Km con longitudes de onda en un rango de $650 \text{ a } 1300\text{nm}$ al desarrollar un FOP de índice gradual con polímero perfluorado en 1995. En 1999, los laboratorios Bell obtuvieron 11Gb/s de FOP de polímero perfluorado de índice gradual en 100m . En el año 2001, Korea y Australia realizaron un progreso significativo al emplear fibra optica con polímero microestructurado.

Entre 1960 y 2005, se trabajó en la mejora de la fibra óptica de plástico de índice gradual (GI). En 2005, se lanzaron al mercado como fibras GI-POF con PMMA y, simultáneamente, se lanzaron al mercado las fibras GI-POF con polímero perfluorado (PF GI-POF).

Se utilizaron materiales como el polímero perfluorado para reducir las pérdidas a 100dB/Km en 650nm porque los enlaces instalados con FOP presentaban muchas perdidas. Las FOP más recientes están hechas de polímero perfluorado y tienen un mayor rango de variación en longitud de onda.

Los mecanismos de absorción y dispersión de la luz causan la pérdida de potencia luminosa en las fibras ópticas. Las perdidas por absorción son causadas por impurezas como moléculas de agua y metales presentes en una fibra óptica. Las impurezas en el material, la interfase núcleo-revestimiento y el extremo de la fibra óptica son las causas del esparcimiento de la luz.

2.3.1 Ventajas y desventajas de la fibra óptica de plástico.

La Tabla 2 muestra los beneficios y desventajas de las fibras ópticas de plástico en comparación con las fibras ópticas de vidrio [17].

Tabla 2. Resumen de ventajas y desventajas de la FOP.

	Ventajas de la FOP	Desventajas de la FOP
1	Liviana y bajo costo	Falta de FOP para altas temperaturas de más de 125°C.
2	Facilidad de conexión y manipulación.	Perdidas en la transmisión
3	Operación con luz del espectro visible	Pocos sistemas con FOP
4	Inmunidad a interferencia electromagnética	Poca producción de FOP
5	Utilizado con equipo barato y sencillo	Reducido practica y certificación con FOP
6	Mayor flexibilidad	Pocos proveedores
7	Tolerancia a curvaturas y vibraciones	Poco conocimiento de FOP

2.3.2 Aplicaciones de las fibras ópticas de plástico.

En contraste con las fibras ópticas de vidrio, que se utilizan normalmente en las telecomunicaciones, las fibras ópticas de plástico tienen muchas aplicaciones en la industria. La FOP se utiliza principalmente en el control industrial y en la industria automotriz. Los enlaces de datos con FOP son resistentes a la inducción electromagnética producida por dispositivos con altas corrientes y voltajes. Los supercomputadores y los servidores se han desarrollado para grandes centros de datos que requieren una gran cantidad de conexiones a distancias cortas de menos de 50 metros. Las oficinas en el hogar, las divisiones de grandes empresas y las oficinas de pequeñas y grandes empresas utilizan redes de área local (LAN).

Además, la FOP es ampliamente utilizada en sistemas militares de aeronavegación, tanques, barcos y naves espaciales debido a su pequeño tamaño, peso ligero, resistencia a las vibraciones y su amplia utilización a cortas distancias [18].

2.3.3 Fuentes de luz.

Las fibras ópticas de plástico pueden transmitir información utilizando una variedad de fuentes de luz. Las fuentes de luz incluyen Diodos Laser, Diodos Emisor de Luz, RC-LED (Diodos Emisor de Luz por Cavidades Resonantes) y Diodos Laser por Emisión de Superficie por Cavidades Verticales (VCSEL). La Tabla 3 muestra las longitudes de onda de cada una de las fuentes de luz mencionadas anteriormente.

Tabla 3. Longitud de onda en las fuentes de luz.

Fuente de luz	LED	RC-LED	VCSEL
Longitud de onda	650nm	650nm	1310 – 1550nm

2.4 Polarizador Óptico.

El filtro óptico, también conocido como polarizador, es un dispositivo que determina la orientación de la oscilación de la luz sobre un eje de transmisión. Es decir, un polarizador es un aparato que transforma la luz natural no polarizada en luz polarizada. [19].

La polarización de la luz consiste en convertir un haz de luz que oscila en diferentes direcciones en un haz de luz que oscile en único plano. Entonces polarizar la luz significa orientarla restringiendo su dirección de propagación. Así pues, la dirección en la que oscila la luz polarizada se llama dirección de polarización. La luz no polarizada está compuesta por un campo eléctrico y un campo magnético oscilantes en diferentes direcciones, de manera que los dos campos son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación de la onda. Al polarizar la luz se obtiene

una onda electromagnética que oscila en una única dirección. Existen tres tipos de polarización de la luz o de cualquier onda electromagnética:

- **Polarización lineal:** la luz está linealmente polarizada cuando la dirección de propagación se produce a lo largo de una línea recta. Este caso ocurre cuando las dos componentes del campo eléctrico están en fase (o en contrafase).
- **Polarización circular:** la luz está circularmente polarizada cuando la dirección de propagación tiene forma de circunferencia. En este tipo de polarización las dos componentes del campo eléctrico están desfasadas 90° .
- **Polarización elíptica:** la luz está elípticamente polarizada cuando la dirección de propagación representa una elipse. En este caso las componentes del campo eléctrico tienen diferentes amplitudes y el ángulo de desfase se encuentra entre 0° y 180° .

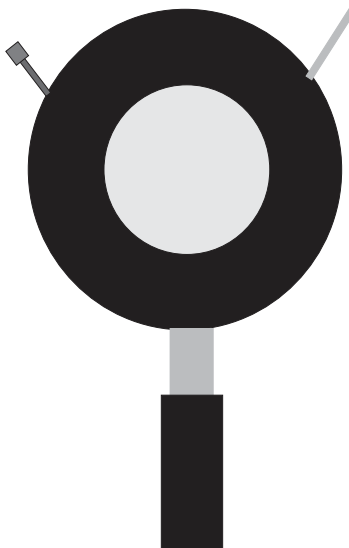


Figura 13. Polarizador óptico.

Cando la luz pasa por el polarizador, la intensidad resultante transmitida, se puede calcular por la ecuación siguiente:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (4)$$

(I) intensidad de la luz transmitida

(I_0) Intensidad de la luz incidente

(θ) ángulo entre el eje de polarización de la luz incidente y el del polarizador

2.5 Acopladores de Fibra Óptica.

Los dispositivos comunes en los estudios de fibra de vidrio monomodo y multimodo son los acopladores y divisores, que se utilizan para una variedad de propósitos. Un acoplador de fibra óptica de plástico, que se ha convertido en un componente crucial de las redes ópticas, se muestra en la figura 14 [20]. Se conoce como dispositivo pasivo y se utiliza para ensamblar o dividir la señal óptica en una red. Los componentes FOP específicos, así como los dispositivos pasivos, deben diseñarse y fabricarse.

Los acopladores son esenciales para realizar una variedad de diseños que requieren la combinación o desacoplamiento de señales ópticas, así como para diseños similares en aplicaciones de detección, monitoreo y prueba de redes [21].

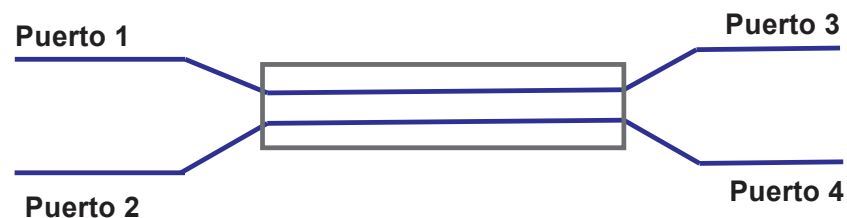


Figura 14. Acoplador de fibra óptica de 4 puertos.

Una de las muchas formas en que se puede fabricar un acoplador de fibra es el acoplador de fusión, en el que los núcleos de las dos fibras se acercan a una separación del orden de sus diámetros. Un método alternativo es una fibra de núcleo dual, que coloca a dos núcleos cerca uno del otro a través de su longitud.

Los modos espaciales se superponen parcialmente en el área de cobertura común en ambos casos a medida que se propagan dentro de cada núcleo. De esta manera, la energía óptica se transfiere de un núcleo al otro mediante la desaparición del par de ondas. Si los núcleos de los acopladores de fibra no son idénticos y están hechos de la misma fibra óptica, se dice que son simétricos. El acoplamiento es la cantidad de potencia distribuida entre las dos salidas y depende de la longitud mínima de separación entre el núcleo y la longitud de onda. Para un acoplador simétrico donde la onda llega continuamente a los puertos de entrada, se puede demostrar que las salidas están representadas por:

$$\begin{pmatrix} A_1(L) \\ A_2(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(kL) & j \sin(kL) \\ j \sin(kL) & \cos(kL) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1(0) \\ A_2(0) \end{pmatrix} \quad (5)$$

La matriz de transferencia 2×2 solo tiene un determinante para un acoplador sin pérdidas. El coeficiente de acoplamiento k , que depende de la separación entre los dos núcleos, se calcula generalmente utilizando la fórmula empírica siguiente:

$$k = \frac{\pi V}{2k_0 n_0 a^2} e^{-(c_0 + c_1 \bar{d} + c_2 \bar{d}^2)} \quad (6)$$

La frecuencia normalizada V se da por:

$$V = \frac{2\pi a NA}{\lambda_0} \quad (7)$$

El radio del núcleo de la fibra óptica es a .

NA es la apertura numérica.

$\bar{d} = d/a$ es la separación normalizada entre los dos núcleos ($\bar{d} > 2$)

Las siguientes relaciones indican cómo las constantes c_0 , c_1 y c_2 dependen del parámetro de la frecuencia normalizada V .

$$c_0 = 5.2789 - 3.663V + 0.3841V^2, \quad c_1 = -0.7769 - 1.225V - 0.3841V^2 \quad \text{y} \quad c_2 = -0.0175 - 0.0064V - 0.0009V^2.$$

Para valores de V y d , esta ecuación es correcta dentro del 1% en un rango entre $1,5 \leq V \leq 2,5$ y $2 \leq d \leq 4,5$. Si solo se introduce un haz en la entrada, la potencia de salida se encuentra mediante el ajuste de $A_2(0) = 0$ y se expresa mediante el par de ecuaciones siguientes:

$$P_1(L) = P_0 \cos^2(kL) \quad (8)$$

$$P_{21}(L) = P_0 \sin^2(kL) \quad (9)$$

donde la potencia del puerto de entrada es $P_0 \equiv (A_0)^2$. La relación de división del acoplador depende del parámetro kL . La potencia se divide igualmente entre los dos puertos de salida si se selecciona la longitud del acoplador de tal manera que $kL = \pi/4$. El acoplador simétrico, 3dB ó 50:50, es un tipo de acoplador. El factor j en el término de la diagonal en la matriz de transferencia, que se muestra en la ecuación 5, indica que un acoplador introduce un desplazamiento de fase de $\pi/2$ entre los dos puertos de salida. Este fenómeno es crucial para la creación de estructuras interferométricas basadas en acopladores de fibra óptica [22].

2.6 Sensores de Fibra Óptica [23].

La capacidad de un sensor para detectar cambios pequeños en magnitudes físicas o químicas se conoce como sensibilidad. Es un parámetro crucial para medir la precisión y la precisión del sensor al detectar variaciones en su entorno [24]. En otras palabras, el sensor es más sensible a la variación de la señal de salida causada por un cambio en la señal de entrada. Por ejemplo, la sensibilidad de un termómetro de mercurio es de 1 cm/°C si se mueve 1 cm mientras la temperatura cambia 1 °C [25].

Los sensores electroópticos pueden modular la luz, es decir, cambiar su intensidad. Para lograrlo, podemos emplear una señal de control de varios tipos, como temperatura, estrés mecánico, campo eléctrico y composiciones químicas, cuya reacción altera los índices de refracción [26].

Las deformaciones o variaciones de temperatura hacen que un sensor de fibra óptica se expanda o contraiga. La luz se modula según la cantidad de expansión o contracción cuando se transmite por la fibra al sensor. Consecutivamente, el sensor transmite una señal óptica a un aparato de análisis, que interpreta la luz reflejada en medidas numéricas del cambio en la longitud del sensor. Estas medidas muestran la temperatura o el nivel de deformación [27].

Los sensores de fibra óptica se pueden catalogar según varios factores. Estos sensores se integran con frecuencia por su ubicación y función en la fibra óptica [28-31]. Los sensores ópticos se pueden categorizar por el tipo de parámetros que están destinados a medir: físicos (parámetros de deformación y temperatura), químicos (parámetros de aceite, pH, amoníaco, detergentes, pesticidas y humedad) o biomédicos (parámetros de oxígeno, dióxido de carbono, células, proteínas y ADN) [32-33].

2.7 El sensor óptico se clasifica como intrínseco o extrínseco según su ubicación [34].

Los sensores intrínsecos emplean una fibra óptica como material (cabezal del sensor) y también como medio para transportar la señal óptica con la información medida como se observa en la figura 15. Se realizan mediante la modulación directa de la luz dirigida hacia la fibra óptica, y la luz no sale de la fibra, excepto en el extremo de detección. En este tipo de sensores, las alteraciones físicas perturban las características de la fibra óptica, alterando las propiedades de la luz que se transmite por la fibra. En otras medidas, por reflexión o dispersión, la luz modulada puede acoplarse de nuevo a la misma fibra y guiarse de retorno al sistema de detección. Los sensores de fibra más simples solo requieren una fuente de luz y un detector para ajustar la intensidad de la luz.

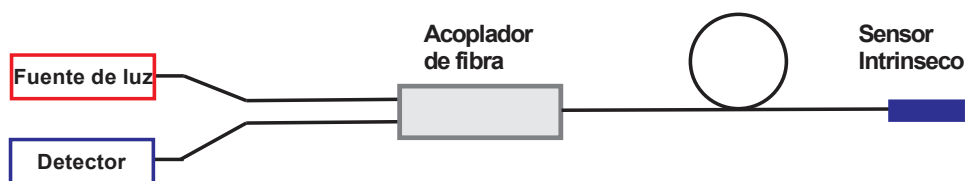


Figura 15. Sensor intrínseco de fibra óptica.

En la detección distribuida a grandes distancias, los sensores de fibra óptica intrínseca se pueden utilizar para medir una variedad de parámetros. Por ejemplo, la temperatura se puede medir analizando la dispersión Raman de la fibra óptica o utilizando una fibra cuya pérdida evanescente cambia con la temperatura; El voltaje eléctrico se puede medir estudiando la polarización de la luz en función del voltaje o campo eléctrico considerando los efectos ópticos no lineales en fibras especialmente dopadas; los ángulos se pueden medir a través del efecto Sagnac; Asimismo, el

reconocimiento de la dirección es posible utilizando una rejilla de fibra especial de largo período [35].

Los sensores de fibra óptica intrínseca también se utilizan en una variedad de campos para una variedad de usos. Se utilizan como hidrófonos para propósitos de sonar y sísmica, mediante la construcción de un sistema con múltiples sensores mediante cable de fibra. La ventaja de estos sensores radica en que pueden detectar simultáneamente la temperatura y la presión acústica en el mismo lugar [36-42]. Esto resulta sumamente útil cuando se obtiene información sobre estructuras pequeñas y complejas. Los sensores de fibra óptica intrínseca en los pozos de petróleo se utilizan para medir la temperatura y la presión de manera precisa. Explorando los efectos de dispersión de Brillouin, que permiten la detección a mayores distancias de 30 km, también es posible la detección simultánea de temperatura y deformación a grandes distancias. Debido a su mayor resistencia a los agentes químicos y su inmunidad a las interferencias electromagnéticas, estos sensores también pueden usarse en imágenes y diagnósticos médicos. Los sensores intrínsecos también se utilizan como giroscopios de fibra óptica de alta precisión para fines de navegación en aviones y automóviles [43-46].

Un sensor de fibra óptica extrínseco o híbrido (normalmente de fibra multimodo) guía la luz hacia una ubicación donde se encuentra el cabezal del sensor óptico, como se muestra en la Figura 16. El cabezal del sensor está fuera de la fibra óptica y está hecho de pequeños componentes que modulan las propiedades de la luz en respuesta a los cambios ambientales y perturbaciones físicas relevantes. Un extremo de la fibra transmite energía óptica al cabezal del sensor, mientras que el otro extremo de la fibra modula y se conecta al sensor óptico.

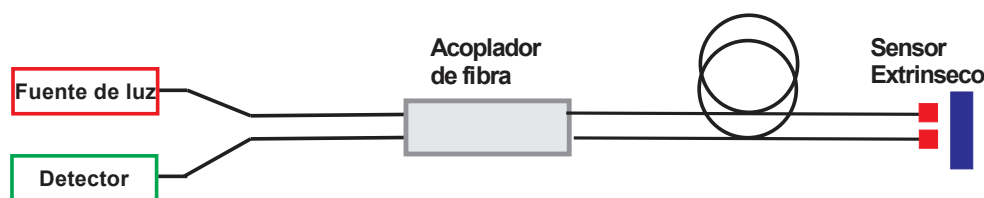


Figura 16. Sensor extrínseco de fibra óptica.

La función de la fibra óptica en este tipo de sensor es simplemente dirigir la luz hacia y desde el cabezal del sensor óptico. Una fibra se utiliza normalmente para enviar la información al cabezal del sensor y una segunda fibra se utiliza para dirigir la luz modulada de regreso al detector óptico. Otra configuración puede usar solo una fibra; la luz modulada puede acoplarse de nuevo por

reflexión o dispersión y luego guiarse de regreso al sistema de detección. Este tipo de sensor puede llegar a lugares que otros métodos de transmisión no pueden, como la temperatura dentro del motor a reacción de un avión o campos electromagnéticos extremos. La vibración, la rotación, el desplazamiento, la velocidad, la aceleración, el par y la temperatura se pueden medir con sensores extrínsecos. Los sensores extrínsecos de fibra óptica ofrecen resistencia al ruido y a la corrupción de la señal, pero la integración con otros tipos de sensores puede ser difícil. Esto se debe a que otros sensores producen una salida eléctrica que luego debe convertirse en una señal óptica. Los interferómetros de Fabry-Perot son un tipo de sensor extrínseco que tienen una cavidad en el extremo de la fibra óptica donde sale la luz. Estos sensores permiten a los usuarios detectar una variedad de parámetros, como la presión y la temperatura en pozos geotérmicos, el ultrasonido, la humedad, el nivel de líquido y el seguimiento de la salud estructural de los puentes [47-48].

2.8 Sensores de fibra óptica basados en modulación.

Los sensores de fibra óptica se pueden clasificar en intensidad modulada, longitud de onda modulada, fase modulada, basada en dispersión o basada en polarización según su principio de funcionamiento.

2.8.1 Sensores de fibra óptica por intensidad modulada.

Los sensores de intensidad modulada fueron los primeros en fibra óptica. Estos sensores pueden detectar cambios físicos o perturbaciones en la luz recibida (pérdida de curvatura, atenuación, campos evanescentes). Las ventajas de este tipo de sensor óptico incluyen su simplicidad y bajo costo; sin embargo, estos sensores son susceptibles a fluctuaciones en la pérdida de potencia óptica, lo que resulta en lecturas erróneas y requiere un sistema de referencia para reducir el problema.

2.8.2 Sensor de fibra óptica modulado por longitud de onda.

El cambio de longitud de onda en la fibra es medido por sensores modulados por longitud de onda. Los sensores de cuerpo negro, fluorescencia y de rejilla de Bragg son sensores modulados en longitud de onda. Dado que es capaz de detectar un solo punto o múltiples puntos, el sensor FBG (fiber Bragg grating) es el tipo más popular de sensor modulado de longitud de onda y se usa con frecuencia en una variedad de aplicaciones.

2.8.3 Sensor de fibra óptica de fase modulada.

El principio de interferometría es utilizado por los sensores de fase modulada para medir la interferencia de la luz de fibra óptica. Estos sensores son populares debido a su sensibilidad y precisión, pero también son costosos. Los interferómetros Mach-Zehnder, Sagnac, Michelson y Fabry-Perot son algunos de los sensores de fase modulada más utilizados.

2.8.4 Sensores de dispersión

Para detectar cambios en la luz dispersa, los sensores basados en dispersión utilizan un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR). Estos sensores son muy populares porque permiten la detección distribuida a lo largo de la fibra y tienen interesantes aplicaciones para monitorear la salud estructural y medir los cambios en la deformación.

2.8.5 Sensores de polarización.

Los sensores basados en polarización pueden detectar cambios en la luz que se producen cuando cambia el estado de polarización. Estos sensores utilizan el fenómeno de birrefringencia de la fibra óptica, que cambia el índice de refracción según la polarización. El efecto birrefringencia, que se produce al aplicar tensión a la fibra óptica, provoca una diferencia de fase detectable [49].

2.8.6 Sensores de fibra óptica de modo espectral.

Los sensores de fibra óptica basados en el espectro dependen de la modulación de la longitud de onda del haz de luz por factores ambientales. Estos tipos de sensores de fibra incluyen los basados en la radiación de cuerpo negro, la absorción, la fluorescencia, y las rejillas dispersivas.

El sensor de cuerpo negro es uno de los tipos de sensores más simples. Una cavidad de cuerpo negro se coloca al final de una fibra óptica. Cuando la temperatura de la cavidad aumenta, comienza a brillar y funciona como fuente de luz. Luego se utilizan detectores y filtros de banda estrecha para medir el perfil de la curva del cuerpo negro y la temperatura.

Este tipo de sensor se ha comercializado con éxito y se utiliza para medir la temperatura en campos intensos con una precisión de unos pocos grados centígrados. Debido a las bajas relaciones señal-ruido, este sensor funciona mejor a temperaturas más altas y es más preciso a temperaturas de aproximadamente 200 grados centígrados. Debido a que esto podría dañar la

integridad de la señal, es importante asegurarse de que el punto más caliente sea la cavidad del cuerpo negro en lugar del cable de fibra óptica [50].

Referencias.

- [1] Antúnez, E. E. (2011). *Determinación de la concentración de LiBr en soluciones de LiBr-H₂O mediante las técnicas ópticas de transmitancia/absorbancia e interferencia multimodos* (Doctoral dissertation, Tesis de Maestría, UAEM–CIICAp, Morelos, México).
- [2] Li, E., & Peng, G. D. (2008). Wavelength-encoded fiber-optic temperature sensor with ultra-high sensitivity. *Optics Communications*, 281(23), 5768-5770.
- [3] Mohammed, W. S., Smith, P. W., & Gu, X. (2006). All-fiber multimode interference bandpass filter. *Optics letters*, 31(17), 2547-2549.
- [4] Tripathi, S. M., Kumar, A., Varshney, R. K., Kumar, Y. B. P., Marin, E., & Meunier, J. P. (2009). Strain and temperature sensing characteristics of single-mode–multimode–single-mode structures. *Journal of Lightwave Technology*, 27(13), 2348-2356.
- [5] Areny, R. P. (2004). *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo.
- [6] Morris, A. S. (2001). Measurement and instrumentation principles. *Measurement Science and Technology*, 12(10), 1743-1744.
- [7] Çengel, Y. A. (2019). *Termodinámica*.
- [8] Pérez García, M. Á. (2014). *Instrumentación electrónica*. Ediciones Paraninfo, SA.
- [9] Saleh, B. E. (1991). a Malvin Carl TEICH. *Fundamentals of photonics*, 18-23.
- [10] Prieto Zapardiel, J. (2014). *Diseño de una red de acceso mediante fibra óptica*. Tesis Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

- [11] GUAMÁN CASTRO, E. R. (2020). *Módulo experimental de laboratorio para detectar fallos en enlaces de fibra óptica monomodo por reflectometría óptica en el dominio del tiempo, a través de un OTDR* (Bachelor's thesis, Quito).
- [12] Ordóñez, J. L. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. Manual formativo de ACTA, (62), 17-31.
- [13]. Pérez García, M. Á. (2004). *Instrumentación electrónica*. Ediciones Paraninfo, SA.
- [14] Ball, D. W. (2006). *Field guide to spectroscopy* (Vol. 8). Bellingham, Washington: Spie Press.
- [15] Cortez, p., 2016. Manual práctico para el cableado de la red aérea de fibra óptica de telconet en la ciudad de quito. Proyecto de Investigación. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- [16] TOMASI, W., MATA H. G. y GONZÁLEZ P. V. (2003). Sistemas de comunicaciones electrónicas. S.I.: Pearson Educación. vol. 4. ISBN 9702603161.
- [17] Ortiz, J. H. S. (2008). Las fibras ópticas de plástico. *Electrónica-UNMSM*, (22), 24-30.
- [18] Polishuk, P. (2006). Plastic Optical Fibers Branco out: IEEE Communications. vol 44. PI'.
- [19] Huertas, R., Valero, E., y Beltrán, A. G. Análisis del estado de polarización. Departamento de Óptica. Universidad de Granada.
- [20] Kumar, K. S., & Machavaram, V. R. (2016). Fabrication and characterization of Low-cost Plastic optical fiber couplers. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 3(6), 1972-1975.
- [21] López, A., Losada, M. Á., Mateo, J., Antoniades, N., Jiang, X., & Richards, D. (2018). Characterization of a Y-Coupler and Its Impact on the Performance of Plastic Optical Fiber Links. *Fibers*, 6(4), 96.

- [22] González, A. (2010). Aplicaciones del Interferómetro de Sagnac de Fibra en Tecnología de Telecomunicaciones y para la Generación de Pulsos Ópticos Ultracortos. [Tesis de maestría]. CIO.
- [23] Pendão, C., & Silva, I. (2022). Optical fiber sensors and sensing networks: overview of the main principles and applications. *Sensors*, 22(19), 7554.
- [24] Peña-Consuegra, J., Pagnola, M. R., Useche, J., Madhukar, P., Saccone, F. D., & Marrugo, A. G. (2023). Manufacturing and measuring techniques for graphene-silicone-based strain sensors. *JOM*, 75(3), 631-645.
- [25] Yan, J. (2015). *Machinery prognostics and prognosis oriented maintenance management*. John Wiley & Sons. Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. p. 107. ISBN 9781118638729.
- [26] Pérez, B. Y. M. (2012). Modulación de coherencia óptica con dispositivos electro-ópticos con aplicaciones en detección de campos eléctricos.
- [27] Rajeev, P., Kodikara, J., Chiu, W. K., & Kuen, T. (2013). Distributed optical fibre sensors and their applications in pipeline monitoring. *Key Engineering Materials*, 558, 424-434.
- [28] Fidanboylyu, K., & Efendioglu, H. S. (2009, May). Fiber optic sensors and their applications. In *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)* (Vol. 6, pp. 2-3).
- [29] N'cho, J. S., & Fofana, I. (2020). Review of fiber optic diagnostic techniques for power transformers. *Energies*, 13(7), 1789.
- [30] Choi, S. J., Kim, Y. C., Song, M., & Pan, J. K. (2014). A self-referencing intensity-based fiber optic sensor with multipoint sensing characteristics. *Sensors*, 14(7), 12803-12815.
- [31] Krohn, D. A., MacDougall, T., & Mendez, A. (2014). *Fiber optic sensors: fundamentals and applications* (Vol. 4). Bellingham, Washington: Spie Press.

- [32] Mittal, S., Sharma, T., & Tiwari, M. (2021). Surface plasmon resonance based photonic crystal fiber biosensors: A review. *Materials Today: Proceedings*, 43, 3071-3074.
- [33] Marazuela, M., & Moreno-Bondi, M. (2002). Fiber-optic biosensors—an overview. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 372, 664-682.
- [34] Zhou, B., Yang, S., Sun, T., & Grattan, K. T. (2014, June). A novel wireless mobile platform integrated with optical fiber sensors. In *23rd International Conference on Optical Fiber Sensors* (Vol. 9157, pp. 1317-1321). SPIE.
- [35] Santos, J. L., Frazão, O., Baptista, J. M., Jorge, P. A. S., Dias, I., Araújo, F. M., & Ferreira, L. A. (2009, November). Optical fibre sensing networks. In *2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)* (pp. 290-298). IEEE.
- [36] Meng, Z., Chen, W., Wang, J., Hu, X., Chen, M., & Zhang, Y. (2021). Recent progress in fiber-optic hydrophones. *Photonic Sensors*, 11, 109-122.
- [37] Lavrov, V. S., Plotnikov, M. Y., Aksarin, S. M., Efimov, M. E., Shulepov, V. A., Kulikov, A. V., & Kireenkov, A. U. (2017). Experimental investigation of the thin fiber-optic hydrophone array based on fiber Bragg gratings. *Optical Fiber Technology*, 34, 47-51.
- [38] Plotnikov, M. Y., Lavrov, V. S., Dmitraschenko, P. Y., Kulikov, A. V., & Meshkovskiy, I. K. (2019). Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications. *IEEE Sensors Journal*, 19(9), 3376-3382.
- [39] Cole, J. H., Kirkendall, C., Dandridge, A., Cogdell, G., & Giallorenzi, T. G. (2004). Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the Naval Research Laboratory. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 40-57.
- [40] Peng, G.D.; Chu, P.L. (2008). *Optical Fiber Hydrophone Systems*, 2nd ed.; Optical Science and Engineering; CRC Press: Boca Raton, FL, USA. Chapter 9.

- [41] Staudenraus, J., & Eisenmenger, W. (1993). Fibre-optic probe hydrophone for ultrasonic and shock-wave measurements in water. *Ultrasonics*, 31(4), 267-273.
- [42] Morris, P., Hurrell, A., Shaw, A., Zhang, E., & Beard, P. (2009). A Fabry–Pérot fiber-optic ultrasonic hydrophone for the simultaneous measurement of temperature and acoustic pressure. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(6), 3611-3622.
- [43] Webb, D. J., Surowiec, J., Sweeney, M., Jackson, D. A., Gavrilov, L. R., Hand, J. W., ... & Bennion, I. (1996, October). Miniature fiber optic ultrasonic probe. In *Fiber Optic and Laser Sensors XIV* (Vol. 2839, pp. 76-80). SPIE.
- [44] Wen, H., Wiesler, D. G., Tveten, A., Danver, B., & Dandridge, A. (1998). High-sensitivity fiber-optic ultrasound sensors for medical imaging applications. *Ultrasonic Imaging*, 20(2), 103-112.
- [45] Zakirov, R., & Umarov, A. (2020, November). Fiber optic gyroscope and accelerometer application in aircraft inertial system. In *2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)* (pp. 1-3). IEEE.
- [46] Imamura, T., Matsui, T., Yachi, M., & Kumagai, H. (2019, September). A low-cost interferometric fiber optic gyro for autonomous driving. In *Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019)* (pp. 1685-1695).
- [47] Bremer, K., Lewis, E., Leen, G., Moss, B., Lochmann, S., Mueller, I., & Schrötter, J. (2010, November). Fibre optic pressure and temperature sensor for geothermal wells. In *SENSORS, 2010 IEEE* (pp. 538-541). IEEE.
- [48] Islam, M. R., Ali, M. M., Lai, M. H., Lim, K. S., & Ahmad, H. (2014). Chronology of Fabry–Perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: a review. *Sensors*, 14(4), 7451-7488.

- [49] Wu, T., Liu, G., Fu, S., & Xing, F. (2020). Recent progress of fiber-optic sensors for the structural health monitoring of civil infrastructure. *Sensors*, 20(16), 4517.
- [50] Gholamzadeh, B., & Nabovati, H. (2008). Fiber optic sensors. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2(6), 1107-1117.

Capítulo 3

Resumen.

Buscando obtener resultados que validen la hipótesis propuesta en este proyecto de investigación, es necesario proponer una metodología experimental con la cual se pueda trabajar para aproximarse a los resultados que sirvan para fundamentar la investigación. En este capítulo se describen los métodos, procesos, materiales y herramientas utilizados para desarrollar el sensor de fuerza de fibra óptica de plástico en base a modulación espectral.

III. Metodología.

3.1 Elaboración de conectores para acoplar FOP de diferentes diámetros.

Debido a las dimensiones de la FOP, es necesario diseñar y fabricar conectores para acoplar FOP de diferentes diámetros a los puertos del acoplador óptico. Estos conectores pueden hacerse de material como el metal maleable, plástico, thermofit o cinta adhesiva. En la figura 17 se muestran imágenes de tipos de conectores usados como muestra [1].

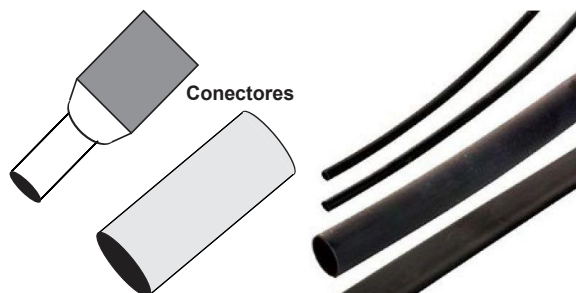


Figura 17. Esquema de conectores para el lazo sensor de FOP.

Los conectores se hicieron cortando el tubo del plástico de hisopos a una longitud de 1cm. Se complementaron con el recubrimiento de la FOP, utilizando trozos de 1cm de longitud ver la figura 18.

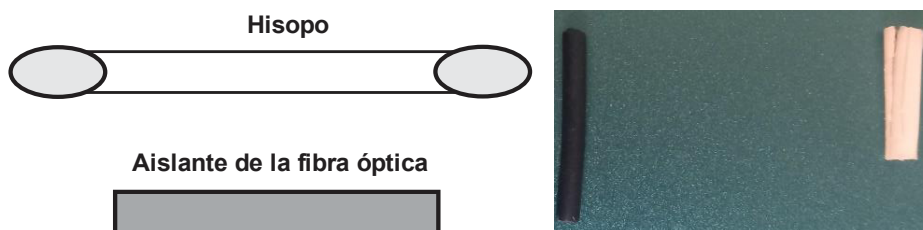


Figura 18. Conectores para unir el lazo de FOP con el acoplador óptico.

3.2 Caracterización de las fibras ópticas plásticas (FOP).

Se aplicó fuerza para caracterizar las fibras ópticas de plástico de diferentes diámetros menores a 3mm con la configuración esquemática y la conexión de instrumentos que se muestra en la figura 19. Un láser de 632nm (Newport-Model ULM-TILT) de 30mW se acopla a un extremo de la fibra óptica de plástico, alineando la base que sostiene la fibra óptica de plástico hasta que la mayor cantidad de luz del láser se acopla a la FOP [2]. La intensidad de salida se registró en el otro extremo de la FOP por un detector de potencia (power meter-Model 843-R) alineado a la base móvil que sostiene la FOP. Se registra la mayor potencia en miliwatts al introducir fuerza variable sobre la FOP en un intervalo de (0-50) N con un medidor de fuerza digital modelo VPOER-VDFG-50.

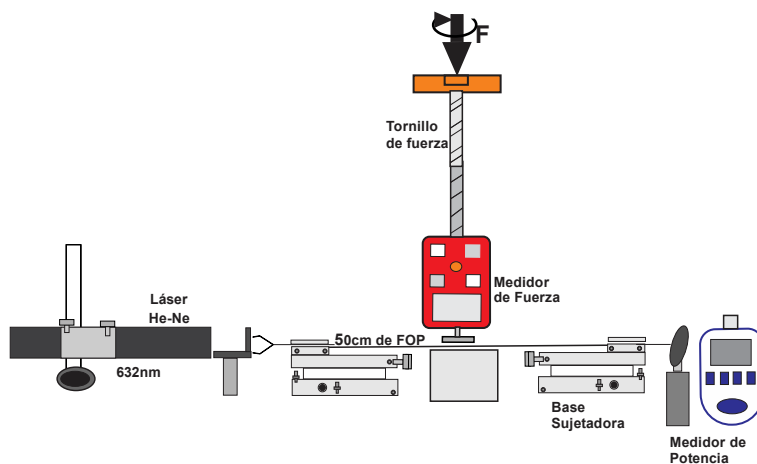


Figura 19. Diagrama esquemático para hacer pruebas de límite máximo de daño o fractura a las FOP.

El arreglo experimental para caracterizar la fibra plástica en el laboratorio de sensores se muestra en la figura 20. Se hicieron pruebas con FOP de 0.25, 0.5, 0.75 y 1mm de diámetro. La longitud de la FOP de plástico utilizada fue de medio metro.



Figura 20. Arreglo experimental usado en laboratorio de sensores.

3.3 Caracterización del acoplador de fibra óptica de plástico.

La figura 21 muestra el esquema experimental utilizado para caracterizar el acoplador de fibra óptica plástica. El objetivo fue verificar el factor de acoplamiento del dispositivo en longitudes de onda alrededor de 632 nm y la relación de división que menciona tener (50:50). El acoplador es de 1mm de diámetro, con 4 puertos. Se utilizó una fuente de luz láser de He-Ne a 632.8nm con una potencia de 30 mW. Como parte del arreglo experimental se usó un objetivo de microscopio óptico (M 40X-0.65) para introducir la luz a la FOP, dos bases sujetadoras Newport 561-FH y un medidor de potencia 843-R. Se introdujo luz laser por el puerto A1 del acoplador a una distancia focal de (2.5 -3) cm. Los puertos A2 y B2 se dejaron al aire. El puerto B1 del acoplador de FOP se alinea con el detector del medidor de potencia para detectar y registrar la intensidad [3].

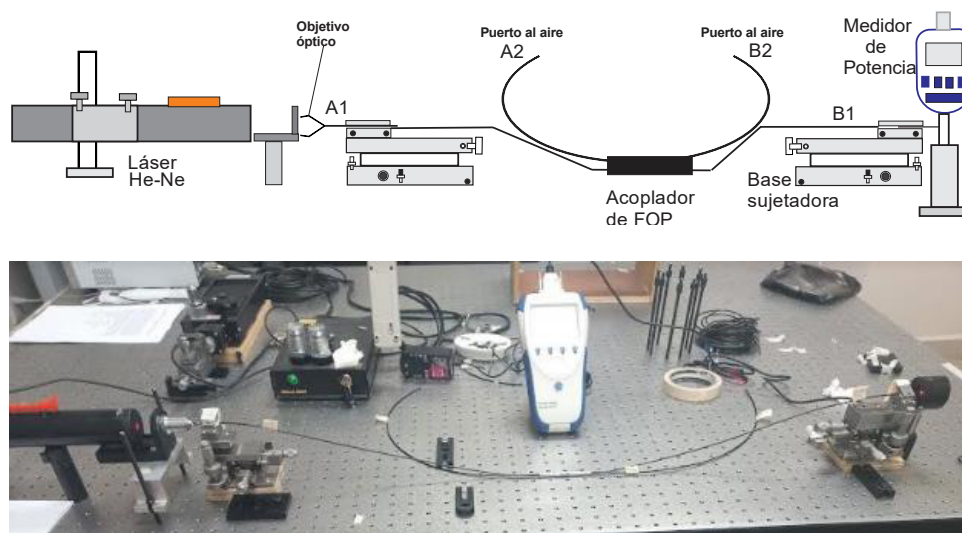


Figura 21. Esquema y conexión física para la caracterización del acoplador de FOP [4].

En el experimento para caracterizar el acoplador, se tomaron como entradas las puntas A1 y A2, entonces, los puertos B1 y B2 son los puertos de salida. En una segunda prueba se intercambian los puertos y las entradas. Es decir, B1 y B2 se etiquetan como entradas mientras las salidas son A1 y A2. Este proceso de intercambiar entradas y salidas se hizo para obtener qué puerto registraba una medición más alta de potencia. Se observó que la medición de potencia óptica obtenida del puerto A1 fue más alta usando el puerto B1 como entrada en comparación con todas las demás combinaciones de los puertos que resultaron más bajos en potencia. Las mediciones de las diferentes configuraciones de los puertos se muestran en la tabla 4

Tabla 4. Datos obtenidos en la caracterización del acoplador de FOP 2x2-50/50.

Puerto de entrada	Puerto de salida	Potencia óptica en el puerto de salida (mW)
A1	B1	6.00
A1	B2	2.48
A2	B1	3.12
A2	B2	5.00
B1	A1	6.11
B1	A2	2.44
B2	A1	3.62
B2	A2	4.43

3.4 Proceso para la modificación diametral de la FOP.

3.4.1 Preparación y desbaste diametral de forma en D al 30%.

Para elaborar el desbaste en forma de D en un segmento de 10cm de FOP, como se muestra en la figura 22, se siguió el siguiente procedimiento:

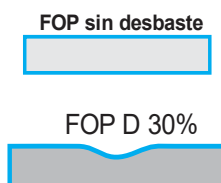


Figura 22. Representación del diámetro original de la FOP y su desbaste en D al 30% [5].

Se cortó una longitud de FOP de 10cm con el cortador de fibra óptica plástica. El trozo de fibra óptica se desbaste y después se utilizó como el denominado lazo que se une al acoplador de fibra óptica de plástico. Finalmente aplicó fuerza variable sobre el segmento de FOP trabajado.



Figura 23. Cortador de fibra óptica y segmento de FOP.

Al lazo de fibra óptica de plástico de 10cm de longitud se le retiro 2cm de recubrimiento utilizando el pelador de fibra óptica, quedando como se muestra en la figura 24.



Figura 24. . Fibra óptica de plástico sin recubrimiento

Las puntas de los extremos del lazo de FOP se alisaron con lija de agua la cual se coloca sobre una base de vidrio como se observa en la figura 25. Cada punta de la FOP se pule gradualmente sobre la base con lija de grano grueso. El acabado se hace puliendo con lija de grano fino. En el pulido se utiliza agua destilada haciendo movimientos en forma de 8 para quitar asperezas y tener un acabado a espejo, en la medida de lo posible, en las puntas de la FOP. Para terminar el proceso se limpian las puntas con alcohol y toallas especiales para quitar el resto de plástico [6].



Figura 25. Base de vidrio y papel de lija fino.

El siguiente paso fue colocar el lazo de 10cm de FOP sin el recubrimiento sobre una base de madera a la cual se fijó con cinta durante el desbaste. Se utilizó un pulidor eléctrico, que de forma gradual le dio forma en D a la FOP, al cual se le adapta una punta lijadora de forma mecánica [7]. Con el vernier se mide la profundidad del desbaste hasta lograr el porcentaje de profundidad deseado.

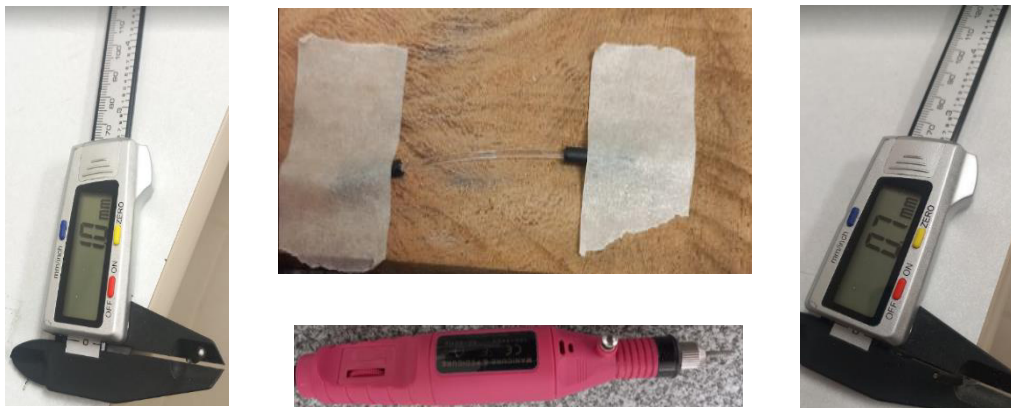


Figura 26. Herramientas para hacer el desbaste mecánico en D.

Después de obtener la forma en D se le aplicó un lijado suave, con lija B-99 2000, para conseguir una superficie más lisa y uniforme. Al terminar se limpió con alcohol isopropílico para quitar cualquier residuo plástico. El desbaste resultante se muestra en la figura 27.



Figura 27. Desbaste diametral final al 30% sobre la FOP en forma de D.

3.4.2 Desarrollo del desbaste en forma de D al 50% en la estructura del diámetro de la FOP.

Un segmento de 10 cm de FOP se prepara para quedar, en lo más posible, como la siguiente imagen, pero con un 50% de profundidad en la superficie de la fibra óptica plástica.

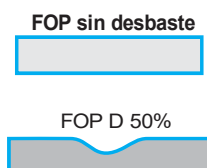


Figura 28. Esquema para el acabado del desbaste en D al 50% de la FOP.

Para obtener el desbaste al 50% en la superficie diametral de la FOP se hizo el mismo procedimiento de la sección 3.4.1. En este caso se profundizó más el pulido hasta llegar al 50% en la parte más honda. Para corroborar se utiliza un calibrador digital que mide el porcentaje del diámetro desbastado y con la lente 4x/0.10 del microscopio (Fisher scientific) se va observando la forma resultante del desbaste sobre la FOP.



Figura 29. Instrumentos utilizados para observar y medir el desbaste.

Una vez conseguido el desbaste adecuado se eliminan las asperezas con lija. Por último, se limpia con alcohol isopropílico quedando como se muestra en la figura 30.

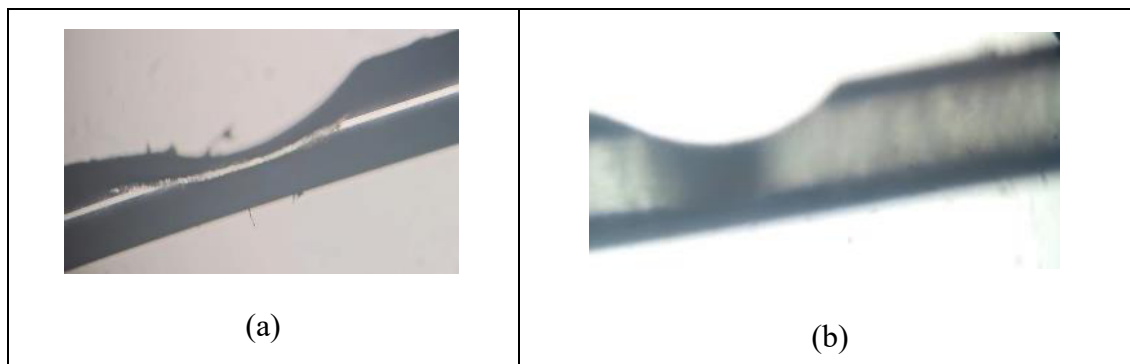


Figura 30. FOP con desbaste D al 50% en la estructura diametral. a) con asperezas, b) sin asperezas.

3.4.3 Proceso para obtener el desbaste en V al 30% y 50% en la estructura de la FOP.

El sensor de FOP se puede sensibilizar a la aplicación de fuerza haciendo una muesca en forma de V en la estructura diametral de la fibra óptica de plástico [8]. La finalidad de este procedimiento es obtener la forma de V sobre la estructura diametral de la FOP como se observa en la imagen.



Figura 31. FOP con desbaste diametral en V a diferentes porcentajes.

El desbaste en forma de V sobre el lazo de FOP de 10 cm de longitud con un 1mm de diámetro se hizo con un cautín especial al cual se le coloca una punta plana tipo V. La temperatura es de 30°C aproximadamente. El tiempo de aplicación de la punta del cautín fue de 1 segundo para obtener el desbaste en V al 30% y de 2s para el desbaste en V al 50%. A mayor temperatura (es decir, $T > 30^{\circ}\text{C}$) la fibra óptica se trozaba completamente debido a que la FOP tiene un rango de operación en un rango de -40°C a $+70^{\circ}\text{C}$. La superficie sobre la que se efectuó la forma en V se limpió con alcohol, para quitar cualquier residuo que pueda alterar el funcionamiento del lazo de FOP.



Figura 32. Forma en V al 30 y 50% sobre la estructura de la FOP.

3.4.4 Proceso para obtener el desbaste cilíndrico al 30% y 50% en la estructura de la FOP.

En la etapa del pulido cilíndrico de la FOP en los diferentes porcentajes de 30% y 50% se efectuó con el pulidor eléctrico utilizado anteriormente usando una broca de cabeza de aguja. El procedimiento fue limar la estructura diametral sobre todo el contorno de la FOP hasta desgastarla de forma gradual. Se midió el diámetro de la FOP con el vernier hasta obtener el desbaste cilíndrico propuesto como se muestra en la Figura 33.

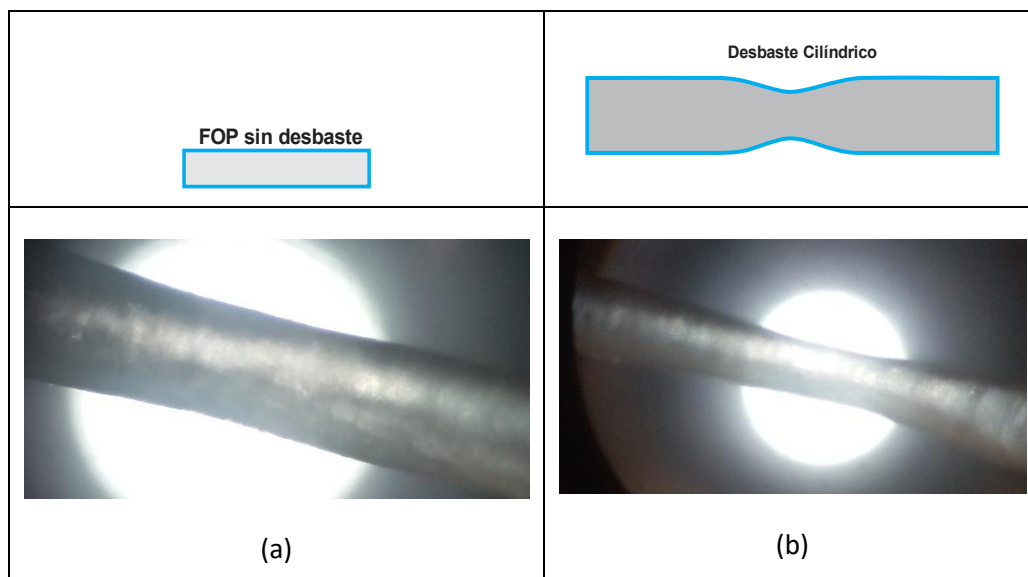


Figura 33. Representación del desbaste cilíndrico al: (a) 30% y (b) 50% de la FOP.

3.5 Empalme mecánico de las fibras ópticas desbastadas al acoplador.

Para empalmar fibras ópticas plásticas es necesario hacerlo de forma mecánica o manual. Esto debido a que no se puede empalmar con arco eléctrico por el rango de temperatura que soporta (-40°C a $+70^{\circ}\text{C}$) y por su gran diámetro ya que no es fácil conseguir conectores en tamaños mayores a 0.25mm. En esta etapa, se requiere conectar el lazo de fibra óptica plástica con el acoplador de FOP, y por esto se utilizan los conectores fabricados en la sección 3.1. En la figura 34 se muestra el esquema de conexión con el acoplador de FOP para cada dispositivo elaborado en el laboratorio. Es importante hacer una buena conexión para que el lazo funcione correctamente y se eviten pérdidas por inserción, por desplazamiento lateral e incluso por cavidades entre las fibras conectadas.

Los cambios espectrales se obtienen conectando un Analizador de Espectros Ópticos (OSA, por sus siglas en inglés) en el puerto A1 y la fuente de luz laser a 632 nm en el puerto A2. El tipo de segmento de FOP desbastado a analizar se coloca entre los puertos B1 y B2. El análisis del comportamiento resultará en un sensor de fuerza con cierta sensibilidad a la perturbación. Los cambios espectrales se obtienen aplicando fuerza de forma gradual en un intervalo de (0 a 500)

N sobre cada muesca hecha en forma de D, V y cilíndrica. Ya que están elaboradas a diferentes porcentajes de desbaste del 30% y 50% de profundidad, se espera que el campo evanescente tenga efecto sobre el comportamiento de cada lazo.



Figura 34. Esquema de configuración para el experimento del empalme del lazo de FOP [9].

El arreglo experimental diseñado en el laboratorio de sensores se muestra en la figura 35. Es importante mencionar que para la caracterización a mayor acoplamiento de luz en la FOP se consideraron las siguientes condiciones: la distancia del láser de He-Ne al objetivo de microscopio óptico se fijó en 2.5cm. La distancia del objetivo al polarizador fue de 0.5mm y la distancia del polarizador al acoplador de FOP fue de 1.2mm. De la misma manera, se cuidó la temperatura ambiente, procurando que siempre estuviera a 25°C.

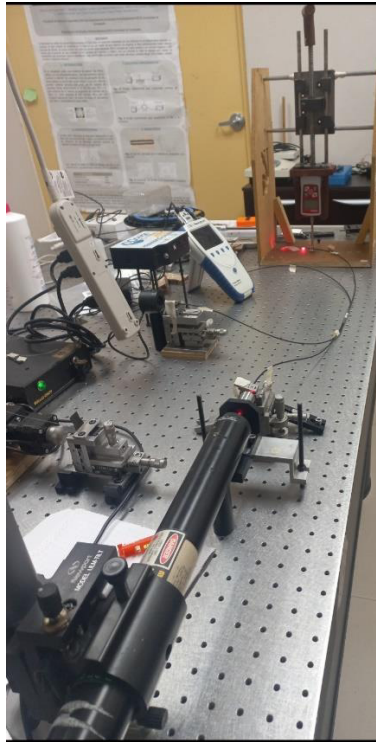


Figura 35. Arreglo físico del sensor de fuerza en el laboratorio de sensores.

En el capítulo 4 se utilizarán los datos obtenidos con el OSA para hacer análisis con el software de Matlab ® y con Origin ® y cuyas gráficas nos permitan observar los resultados para una interpretación posterior y que permitan explicar el comportamiento de los espectros resultantes.

Referencias.

- [1] Sugita, E., Nagase, R., Kanayama, K., & Shintaku, T. (1989). SC-type single-mode optical fiber connectors. *Journal of Lightwave Technology*, 7(11), 1689-1696.
- [2] Marín del Toro, A. J. (2015). Caracterización de conmutadores basados en fibras ópticas de plástico y cristal líquido para redes en el hogar.
- [3] Kumar, K. S., & Machavaram, V. R. (2016). Fabrication and characterization of Low cost Plastic optical fiber couplers. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 3(6), 1972-1975.
- [4] Suhantoro, M., & Yulianti, I. (2021). Back scattering method based-plastic optical fiber coupler viscosity sensors. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1918, No. 2, p. 022014). IOP Publishing.
- [5] De-Jun, F., Mao-Sen, Z., Liu, G., Xi-Lu, L., & Dong-Fang, J. (2014). D-shaped plastic optical fiber sensor for testing refractive index. *IEEE Sensors Journal*, 14(5), 1673-1676.
- [6] Kuczkowski, M., Ying, C., Dinh, X. Q., Shum, P. P., Rutkowska, K. A., & Woliński, T. R. (2012). Microfiber Sagnac Interferometer for sensing applications. *Photonics Letters of Poland*, 4(4), 134-136.
- [7] Xue, P., Yu, F., Wu, B., Bao, H., & Zheng, J. (2019). Investigation of a D-shaped plastic optical fiber assisted by a long period grating for refractive index sensing. *IEEE Sensors Journal*, 20(2), 842-847.
- [8] Ying, D. Q., Tao, X. M., Zheng, W., & Wang, G. F. (2012). Fabric strain sensor integrated with looped polymeric optical fiber with large angled V-shaped notches. *Smart materials and structures*, 22(1), 015004.
- [9] Samano, A. Á., Rivera, J. A. C., Nieto, A. G. S., Segura, J. F. E., González, N. M., & Chávez, R. I. M. (2022). Efecto de la polarización en fibra óptica plástica de diámetro reducido para aplicaciones de sensado. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 16.

Capítulo 4

Resumen.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos al aplicar fuerza de forma gradual cada 2 newtons (N) sobre una fibra óptica plástica (FOP) recta y después como lazo de 50 cm de longitud, sin desbaste, con la finalidad de caracterizar FOP de diámetros de 0.25, 0.5, 0.75 y 1mm a fuerza aplicada. Más adelante, se muestran los resultados de la FOP como sensor de fuerza con desbaste en el lazo de 10cm de longitud y unido a un acoplador de 2x2 puertos y con un factor de división de señal del 50:50. Además se utilizó un polarizador a 60° para no saturar el espectrofotómetro ni el medidor de potencia y observar la contribución de la luz polarizada en la sensibilidad del sensor.

IV. Sensor de fuerza de fibra óptica de plástico por medio de modulación espectral. (Resultados)

4.1 Caracterización inicial sin desbaste.

Recordando que para caracterizar las fibras ópticas de plástico aplicando fuerza, se usó la configuración esquemática y la conexión de instrumentos que se muestra en la figura 36. En el diagrama esquemático se observa que se alinea un extremo de la fibra óptica de plástico colocada en una base que la acerca al foco de una lente 40X hasta que se logra acoplar la mayor cantidad de luz láser en su núcleo. El láser utilizado es de gas He-Ne con una potencia de 30mW y una longitud de onda de alrededor de 632nm (nm= nanometros), marca Newport (Modelo ULM-TILT). El extremo de incidencia de la luz láser se alinea para registrar la mayor potencia introducida en el núcleo. La potencia de salida se registró por un detector de potencia (medidor de potencia, modelo 843-R), el cual también se coloca delante de una base móvil que sostiene el extremo de salida de la FOP [1]. El resultado de esta etapa se registró como una potencia máxima acoplada por la fibra óptica y con este valor se prosiguió a caracterizar las diferentes fibras propuestas para este trabajo de tesis en un intervalo de fuerza de (0 – 50) N.

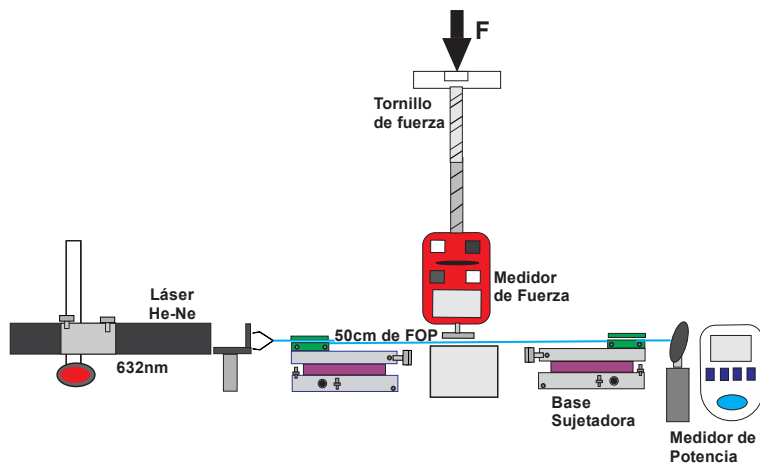


Figura 36. Diagrama esquemático de pruebas de daño o fractura límite para las FOP.

4.1.1 Caracterización de la FOP de 0.25mm.

En esta etapa del experimento se utilizó el esquema de la figura 36 y una fibra óptica de plástico de 50cm de longitud y un núcleo de 0.25mm de diámetro para aplicarle variación gradual de fuerza en un intervalo cerrado de fuerza de (0-50) N [2].

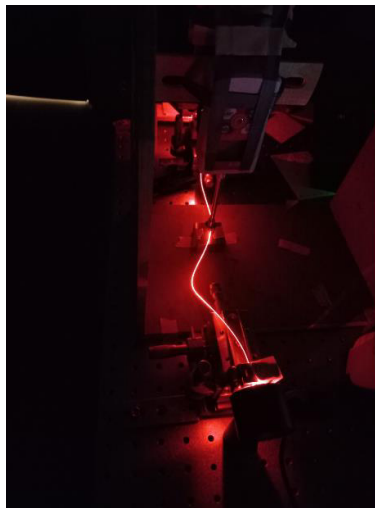


Figura 37. Caracterización de la FOP de 0.25mm.

Las mediciones se registraron cada 2N y se midieron los cambios de la potencia de la luz láser en el extremo de salida de la FOP. Se observó un comportamiento descendente en la señal detectada con cambios de pendiente rápidos en el dominio de las rectas pendientes de la función

$P(F)$ entre los intervalos (0-5) N, y (10-12) N. También se observa una menor pendiente o cambio en los intervalos de (5-10) N y de (11-50) N ya que no se aprecia un valor constante en el rango de potencia [3]. La potencia inicial de referencia (i.e. sin aplicar fuerza) se registró en 2.359mW (mW= mili Watts) y al llegar a límite máximo de cambio medido en 50N la potencia registrada descendió hasta 1.867mW, observándose un cambio de potencia de $\frac{\Delta P}{\Delta F} = 0.492mW$ en el intervalo total de fuerza aplicada de (0-50) N.

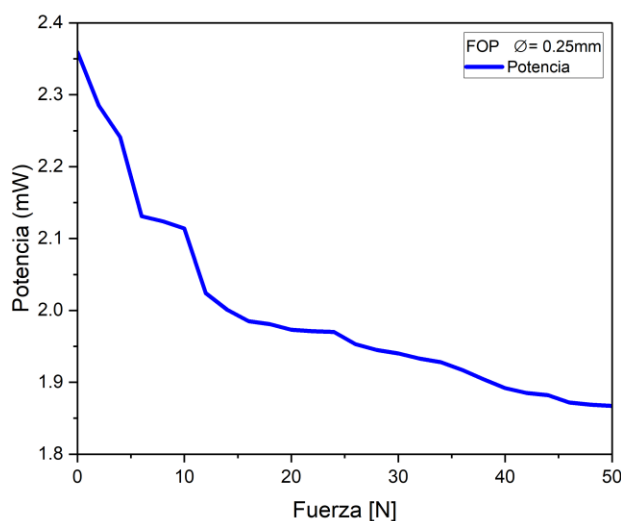


Figura 38. Variación de la intensidad al aplicar la fuerza sobre la FOP de $\varnothing=0.25mm$.

4.1.2 Caracterización de la FOP de diámetro 0.5mm.

Para la fibra óptica con un diámetro en el núcleo de 0.5mm se utilizó el arreglo de la figura 36 [4]. En este experimento la potencia de salida inicial registrada fue de 4.1mW. Al aumentar la fuerza en incrementos de 2N sobre la FOP en un intervalo cerrado de (0-50) N, la potencia medida disminuyó hasta 3.95mW como se observa en la figura 39.

Observamos que esta señal se compone de pequeñas rectas con diferente pendiente, mostrando cambios muy pequeños en el rango de la potencia en función de la fuerza gradual aplicada. Entonces la $P(F)$ varía en rangos muy pequeños de potencia resultando de $\frac{\Delta P}{\Delta F} = 0.15mW$.

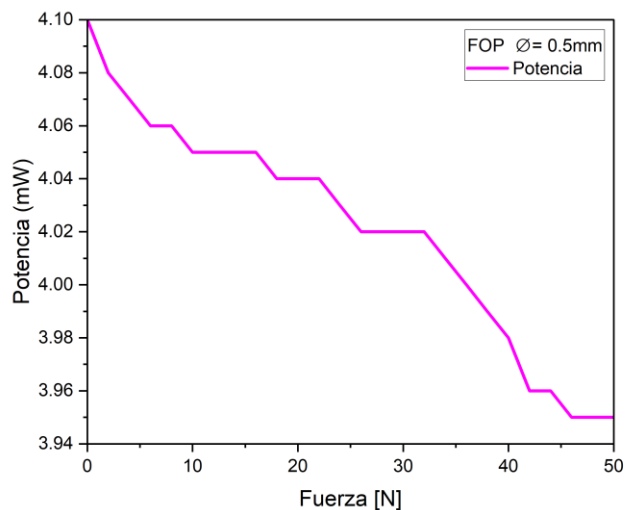


Figura 39. Cambios de la intensidad al variar la fuerza sobre la FOP con $\varnothing=0.5\text{mm}$.

4.1.3 Caracterización para la FOP con $\varnothing=0.75\text{mm}$.

Con el mismo arreglo experimental se caracterizó la fibra óptica plástica de 0.75mm de diámetro en el núcleo y con longitud de 50cm. La potencia inicial en 0 newtons (N) se registró como $P(0) = 5.27\text{mW}$ con un avance gradual de medida de $\Delta f = 2\text{N}$ obteniéndose en el extremo superior de medida $P(50) = 5.21\text{mW}$ [5].

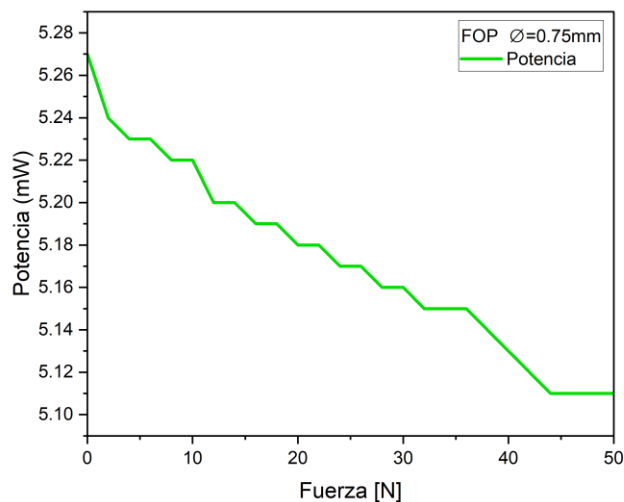


Figura 40. Cambio en la intensidad al modular la fuerza sobre la FOP con $\varnothing=0.75\text{mm}$.

La señal de la gráfica muestra variaciones muy pequeñas en rectas con pendiente. Los extremos del rango dinámico de la función $P(F)$ resultaron muy pequeños por lo que el resultado del cambio absoluto es de $\frac{\Delta P}{\Delta F} = 0.16\text{mW}$.

4.1.4 Caracterización de la FOP con $\varnothing=1\text{mm}$.

El resultado experimental de la fibra óptica plástica de 1 mm de diámetro se registró con una potencia inicial de $P(0) = 6.1\text{mW}$ y final de $P(50) = 3.95\text{mW}$ en el intervalo de (0-50) N de fuerza. El cambio de potencia absoluta en el rango dinámico estudiado resulta de $\frac{\Delta P}{\Delta F} = 2.15\text{mW}$.

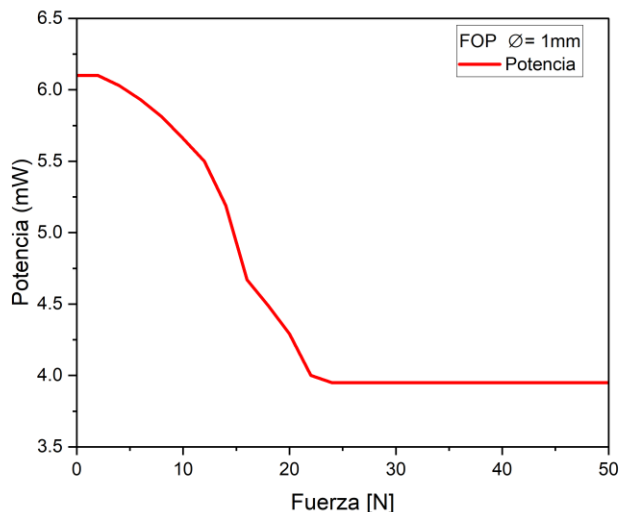


Figura 41. Cambio en la potencia al modular la fuerza sobre la FOP de $\varnothing=1\text{mm}$.

Además, la función $P(F)$, se comporta en los primeros 22N como una curva suave en respuesta a la fuerza aplicada, volviéndose una recta de valor constante en el intervalo de (22-50) N lo que significa que, en ese intervalo, la fibra tiene una respuesta constante o que $\frac{\Delta P}{\Delta F} = 3.95\text{mW}$ hasta el extremo límite de fuerza aplicada.

4.1.5 Análisis de las 4 fibras ópticas de plástico con diferente diámetro.

Para facilitar el análisis del comportamiento de la respuesta de todas las FOP en conjunto, se realizó la normalización de las 4 graficas resultantes y se colocaron en un solo gráfico, ver la figura 42. De esta forma se puede ver que la fibra óptica plástica de 1mm diámetro muestra un máximo de potencia en $P(0) = 6.1\text{mW}$ cuya forma convexa muestra un decremento de los valores del rango de la función en un intervalo cerrado de (0-24) N de fuerza. Es decir, a medida que se incrementó gradualmente la fuerza sobre la FOP, se observa inicialmente una curva suave que representa la caída de la potencia lumínica en comparación con las otras 3 fibras ópticas de menor diámetro. En el intervalo de (24-50) N aproximadamente, se registró la potencia de valor más pequeño para las 4 FOP resultando el de la fibra de 1mm de diámetro el más bajo registrado en 0.6475mW [6].

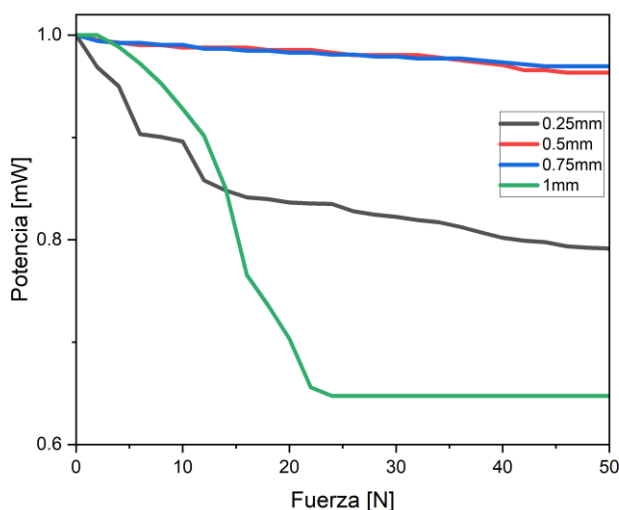


Figura 42. Diferencia de la potencia en función de la fuerza aplicada sobre las FOP.

Se puede ver también en esta gráfica normalizada, que la fibra de 0.75mm y 0.5mm tienen una respuesta muy similar debido a los cambios de fuerza en el mismo intervalo de 0 a 50N. Se obtuvieron funciones muy similares de poca pendiente y rangos muy pequeños de potencia. Sin embargo, la respuesta a la fuerza aplicada sobre la fibra óptica de 0.25mm en un rango de (0.8-1.0) mW, se observa como variaciones rápidas y cambios abruptos. Estas pequeñas pendientes constituyen la función $P(F)$ en un intervalo de (0 a 15) N. Además, se puede observar que en el intervalo de (15-50) N el cambio es más suave y de menor inclinación.

4.2 Resultados de la caracterización de la FOP como lazo sin desbaste y con desbaste.

En esta etapa del experimento, se analizó la respuesta de las FOP como lazo al unirse a un acoplador. El análisis se hizo en un intervalo de fuerza de (0-500) N en pasos de 10N debido a que las FOP de la etapa anterior resistieron sin daño la fuerza aplicada en un intervalo menor de (0-50) N. Además, ahora se utilizó un analizador de espectros marca *Ocean Optics*® en un intervalo de longitud de onda de (300-1100) nm buscando posibles respuestas de interferencia en algún tramo del espectro. Las pruebas hechas con el lazo sin desbaste diametral se utilizarán como un punto de referencia inicial para poder comparar los resultados siguientes con esta

referencia. Las condiciones de prueba serán similares en fuerza e intervalo de aplicación con la diferencia de que los lazos ahora serán modificados con desbaste estático en forma de D, V y cilíndrico.

4.2.1 Caracterización del lazo de FOP sin desbaste en su diámetro.

En la figura 43 se muestra un Acoplador de Fibra Óptica Plástica (AFOP) 50/50, de 2x2 al cual se le unió un lazo de FOP de 10cm sin desbaste. Este dispositivo se acopló en los puertos B1 y B2 para utilizarlo como el segmento sensor a la variación de la fuerza. Introduciendo luz laser a 632.8nm por el puerto A1, se registraron los resultados en el puerto A2 del acoplador. En esta etapa del proyecto se trabajó con el analizador de espectros, ya que teóricamente podría obtenerse un espectro de interferencia, sin embargo, por la teoría y el tipo de fibra, este resultado podría no ser posible, lo cual se verifico experimentalmente y lo que se deja para trabajos futuros.

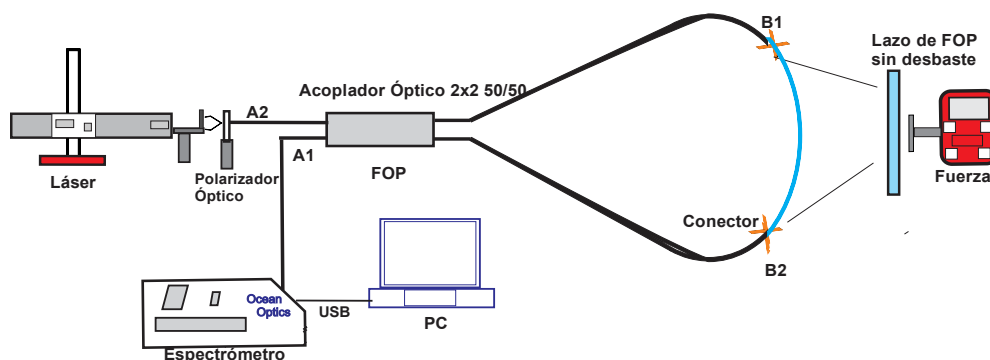


Figura 43. Esquema del acoplador óptica con el lazo sensor de FOP sin desbaste [7].

Como resultado de aplicar fuerza gradual al lazo, en un intervalo de (0-500) N en incrementos de 10N solo se observaron cambios en el ancho del espectro de la luz laser. como se aprecia en las figuras 44 y 45.

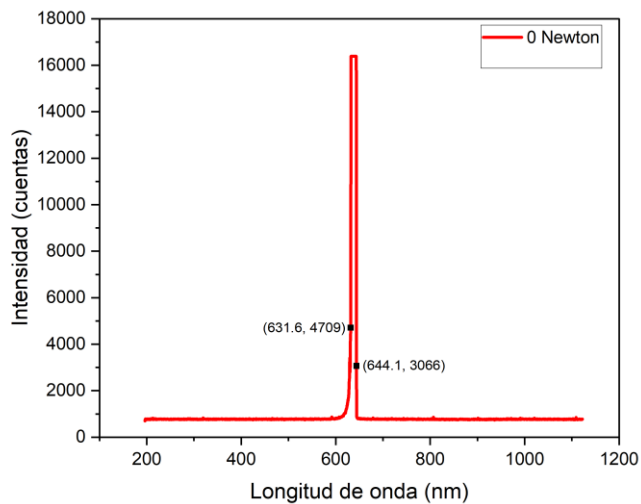


Figura 44. Lazo de FOP sin desbaste a 0N.

El espectro resultante se encuentra en un intervalo de (631.6 - 644.1) nm para una fuerza aplicada de 0N. En 500N se observó un cambio en el ancho espectral registrado de (631.1-642) nm. Si llamamos (λ_0) a longitud de onda inicial y (Δ_f o Δ_{500}) a longitud de onda final registrada en cada medida podemos sacar una diferencia del ancho espectral de la siguiente manera: $\Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_0$.

Tabla 5. Respuesta del lazo sin desbaste en los extremos del espectro láser

Fuerza Aplicada (N)	λ_0 (nm)	λ_{500} (nm)	$ \Delta\lambda $ (nm)
0	631.6	644.1	12.5
500	631.1	642	10.9

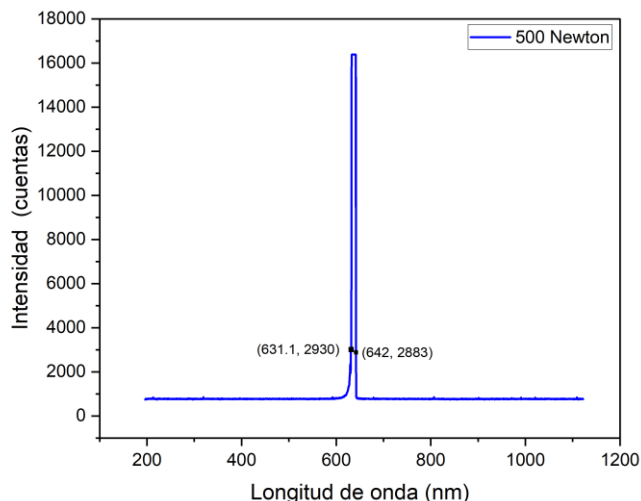


Figura 45. Lazo de FOP sin desgaste aplicando 500N.

Resulta interesante conocer cuánto se mueven los extremos del espectro en longitud de onda (λ) para analizar su desplazamiento total por efecto de la fuerza aplicada. Esta característica es importante ya que muestra que lado del espectro, con estas fibras ópticas plásticas, es más sensible a dicha perturbación externa. Para esto se restan las longitudes de onda iniciales y finales de la siguiente manera:

$$\Delta\lambda_{0f} = |\Delta\lambda_{01} - \Delta\lambda_{02}| \quad (10)$$

$$\Delta\lambda_{500f} = |\Delta\lambda_{f1} - \Delta\lambda_{f2}| \quad (11)$$

Con las ecuaciones 10 y 11 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 6. Resultado del desplazamiento lateral del espectro en el intervalo (0-500) N

$\Delta\lambda_{0f}$	0.5 nm
$\Delta\lambda_{500f}$	2.1 nm

Este resultado muestra que se indujo un estrechamiento o reducción del espectro con la fuerza aplicada. Cabe mencionar que la amplitud en intensidad (cuentas) del espectro se mantuvo en 16380 con el aumento gradual de la fuerza en el intervalo de (0-500) N, como se observa en la figura 46. Para complementar la información resultante se midió la potencia del lazo sin desgaste

cuyos valores en los extremos del intervalo (0-500) N fueron $P_0 = 0.371mW$ y $P_{500} = 0.369mW$, respectivamente.

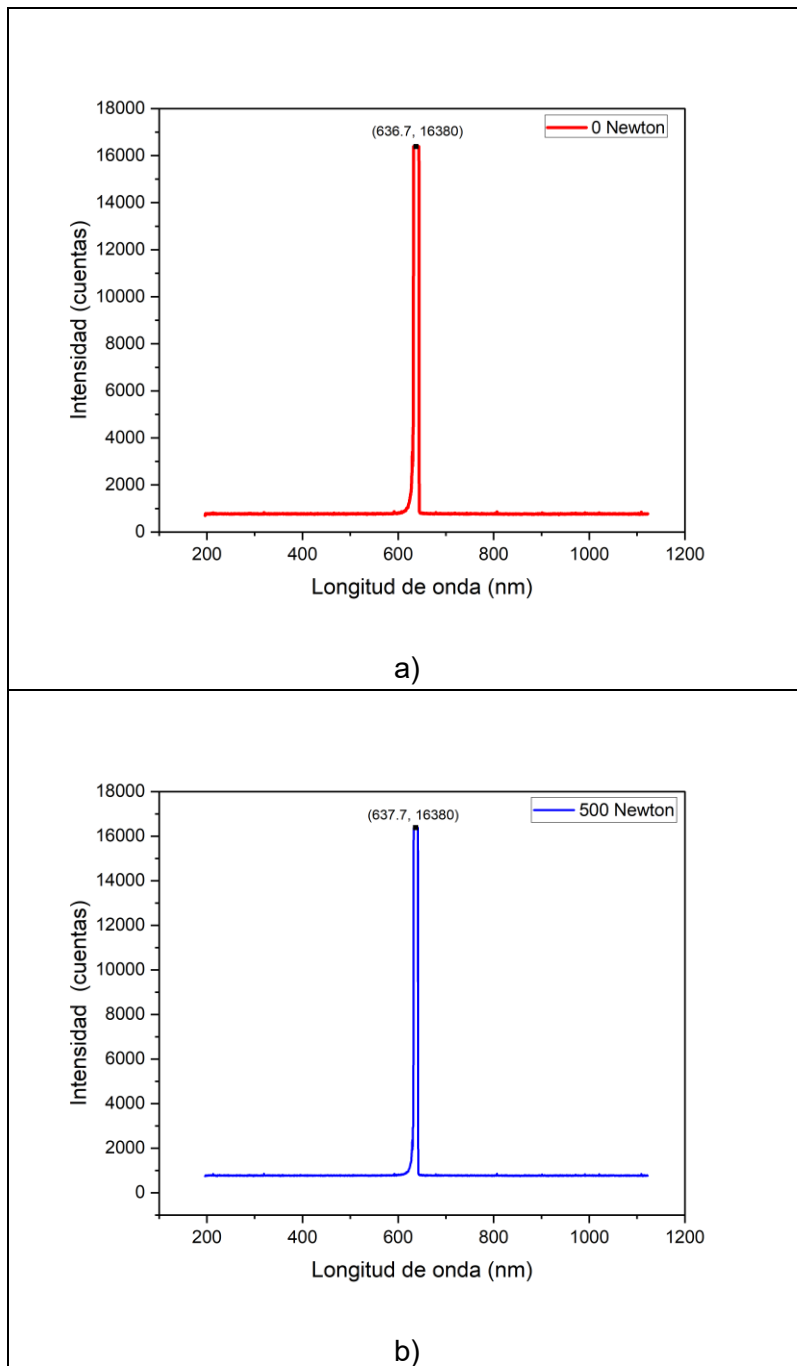


Figura 46. Amplitud de la medida con FOP sin desbaste a) 0N y b) 500N.

En la siguiente etapa de resultados experimentales del proyecto se muestra la respuesta del desplazamiento de los extremos espectrales en el intervalo de fuerza aplicada. Los lazos tienen ahora diferentes desbastes, a porcentajes de profundidad del 30% y 50% y una longitud máxima de 10cm.

4.2.2 Respuesta del lazo de FOP con desbaste diametral en D al 30% de profundidad.

El siguiente esquema experimental se utilizó para hacer pruebas con todos los lazos con desbaste.

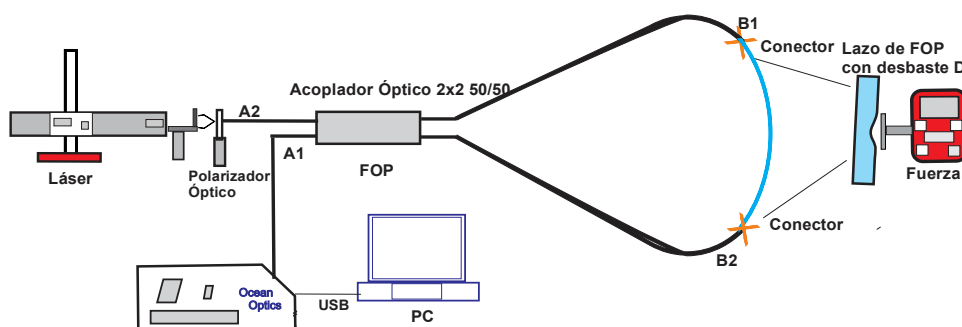


Figura 47. Configuración esquemática para aplicar fuerza en el lazo [8].

Tabla 7. Respuesta del lazo con desbaste al 30% en los extremos del espectro láser.

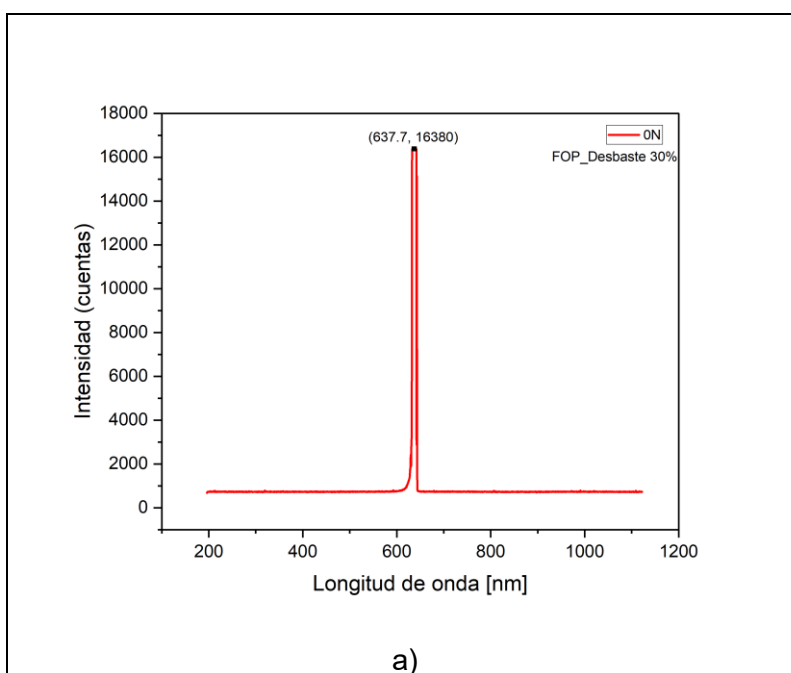
Fuerza Aplicada (N)	λ_0 (nm)	λ_{500} (nm)	$ \Delta\lambda $ (nm)
0	631.3	643.8	12.5
500	632.3	637.7	5.4

Utilizando las ecuaciones 10 y 11 se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 8. Resultado del desplazamiento lateral del espectro del lazo al 30% de desbaste.

$\Delta\lambda_{0f}$	1 nm
$\Delta\lambda_{500f}$	6.1 nm

La potencia registrada en los extremos del intervalo de (0-500N) para el lazo de FOP con desbaste en D al 30% fue de $P_0 = 0.844mW$ y $P_{500} = 0.815mW$ respectivamente. Se observa que se presenta un decremento de potencia de $\frac{dP}{dF} = -0.029mW$ por el aumento de fuerza.



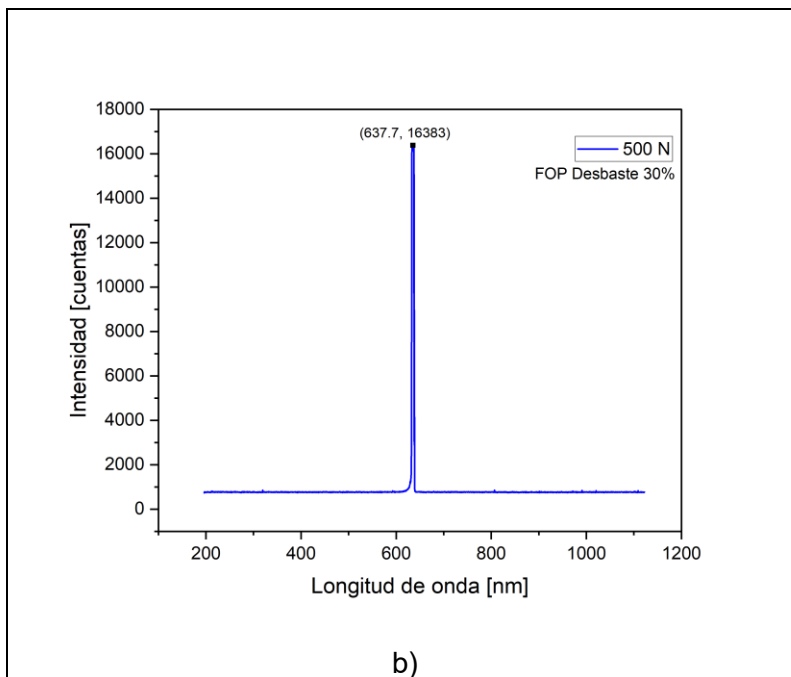


Figura 48. Amplitud de la medida a) 0N y b) 500N con lazo desbastado en D al 30%.

4.2.3 Experimento con lazo de FOP con desbaste diametral en D al 50%.

Usando el mismo esquema experimental de la figura 47, se aplica fuerza en el intervalo de (0-500) N sobre el lazo sensor desbastado. Con el OSA se obtuvieron las siguientes lecturas de los extremos del espectro, $\lambda_i = 632.3nm$ y $\lambda_{500} = 640.5nm$.

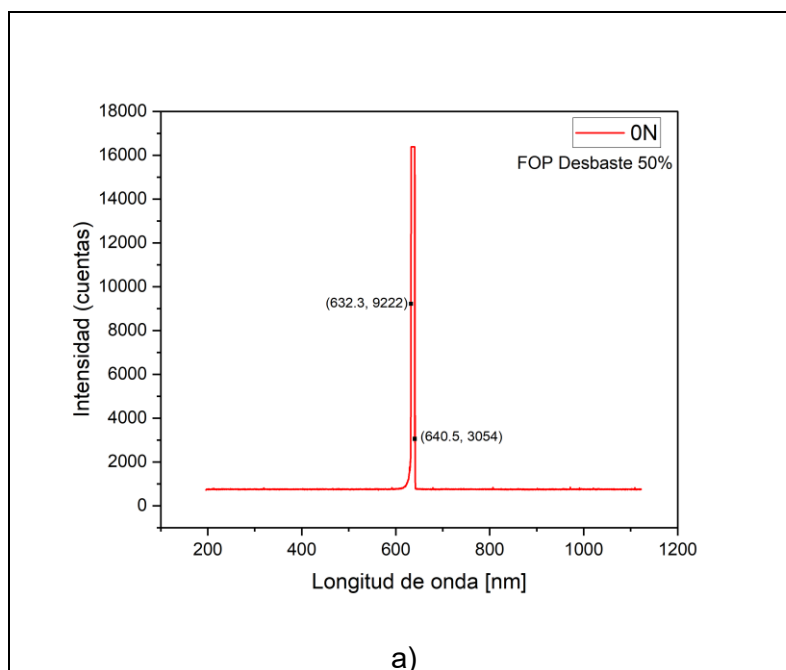
Tabla 9. Respuesta del lazo en D con desbaste al 50% en los extremos del espectro láser.

Fuerza Aplicada (N)	λ_0 (nm)	λ_{500} (nm)	$ \Delta\lambda $ (nm)
0	632.3	640.5	8.2
500	632.6	637.2	4.6

Con estas lecturas y las ecuaciones 10 y 11 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 10. Respuesta del lazo en D con desbaste al 50% en los extremos del espectro láser.

$\Delta\lambda_{0f}$	0.3nm
$\Delta\lambda_{500f}$	3.3 nm



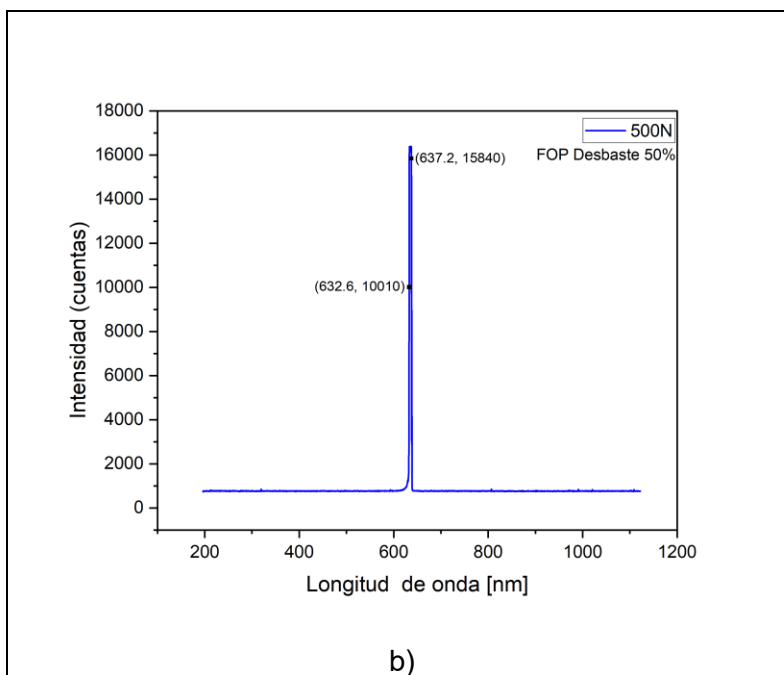


Figura 49. Lazo de FOP con desbaste en D al 50% a) 0N, b) 500N.

La respuesta en amplitud del espectro en 0N y 500N, del lazo con desbaste en D al 50%, mostró un valor de 16380 cuentas que se mantuvo constante en ambos extremos del intervalo de fuerza aplicado, como se observa en la figura 50:

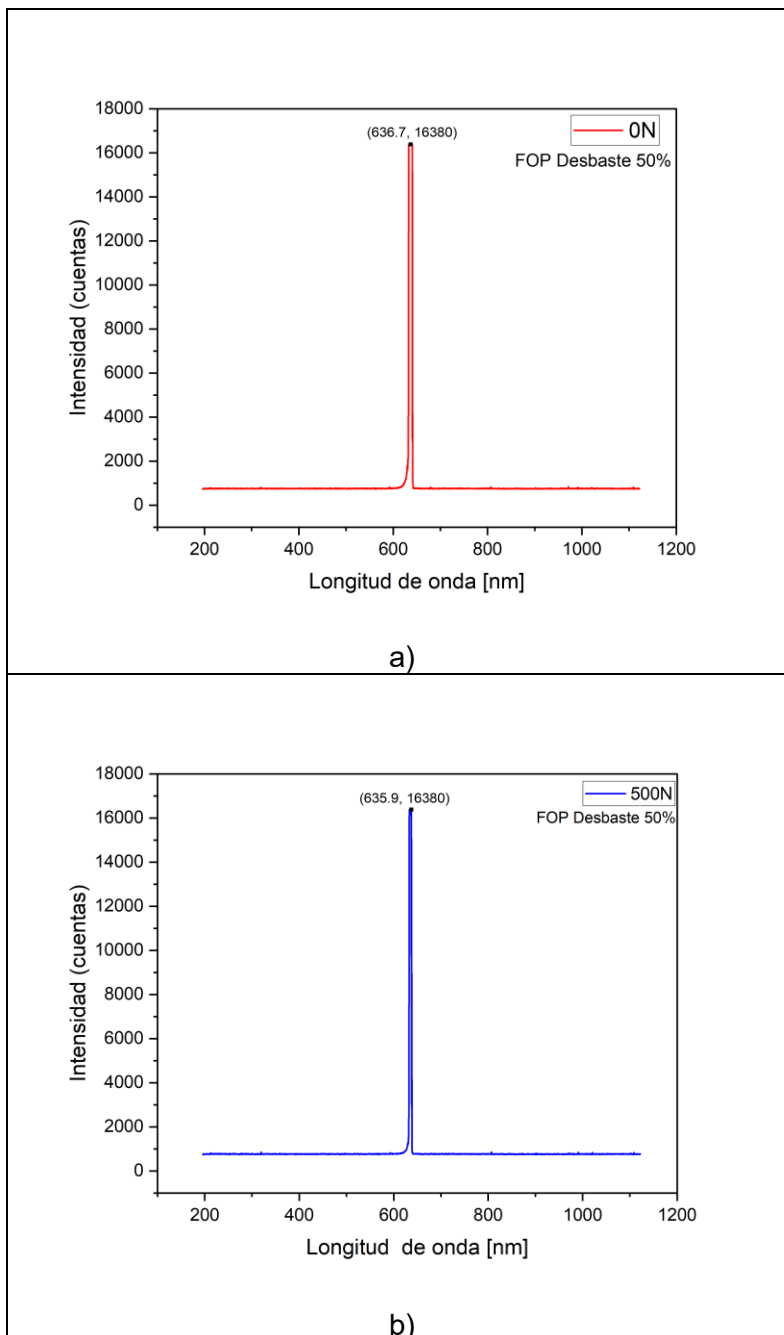
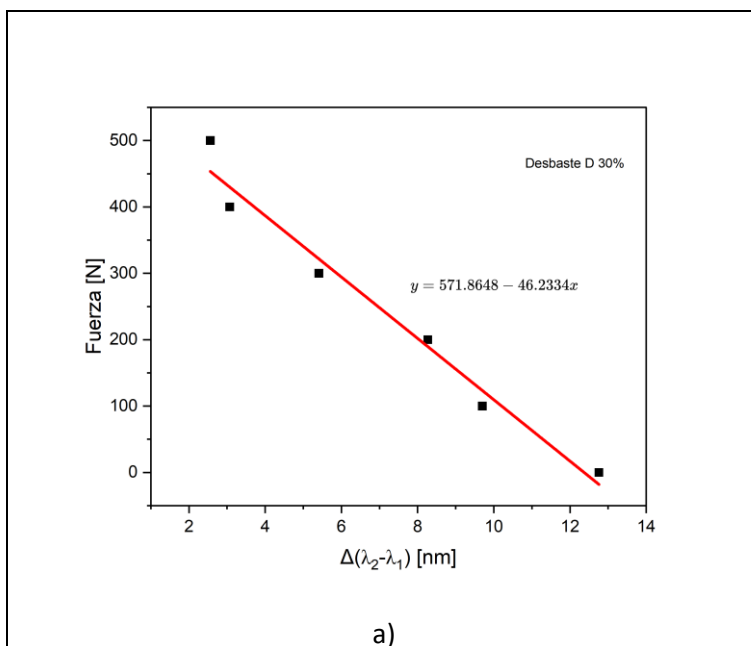


Figura 50. Potencia del espectro debida al lazo desbastada en D al 50% y fuerza en a) 0N y b)500N.

4.2.4 Comportamiento del lazo como sensor de Fuerza con desbaste en D.

Las siguientes gráficas, de la figura 51, muestran la respuesta con tendencia lineal de los lazos con desbastes de 30% y 50%. Prácticamente es un análisis de la sensibilidad del dispositivo respecto a la fuerza aplicada por longitud de onda. La gráfica muestra una recta con pendiente decreciente y se puede observar que, a mayor fuerza aplicada, el dispositivo muestra un menor desplazamiento o ensanchamiento del espectro.



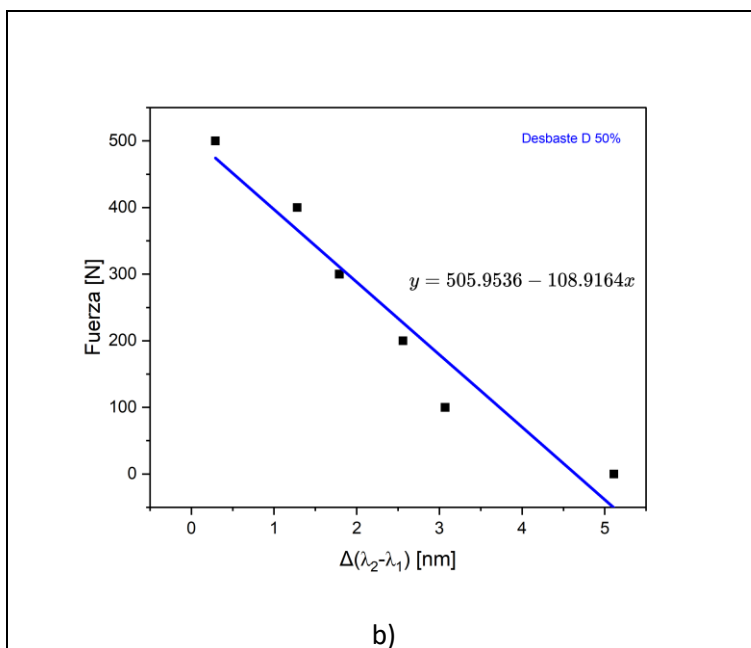


Figura 51. Respuesta del cambio espectral debida a la fuerza aplicada en lazo a) 30% y b) 50%.

En esta etapa del experimento se utilizó un lazo de FOP con desbaste diametral en forma de V. Los experimentos se hicieron con un procedimiento similar a la sección anterior y el mismo esquema experimental.

4.2.5 Resultados del experimento con lazo de FOP con desbaste diametral en V al 30%.

El esquema experimental de la figura 52 fue utilizado para hacer las pruebas con un lazo de 10cm de largo.

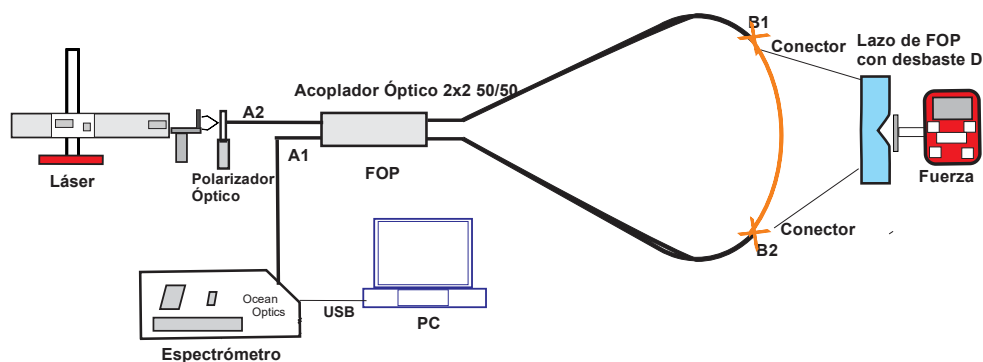
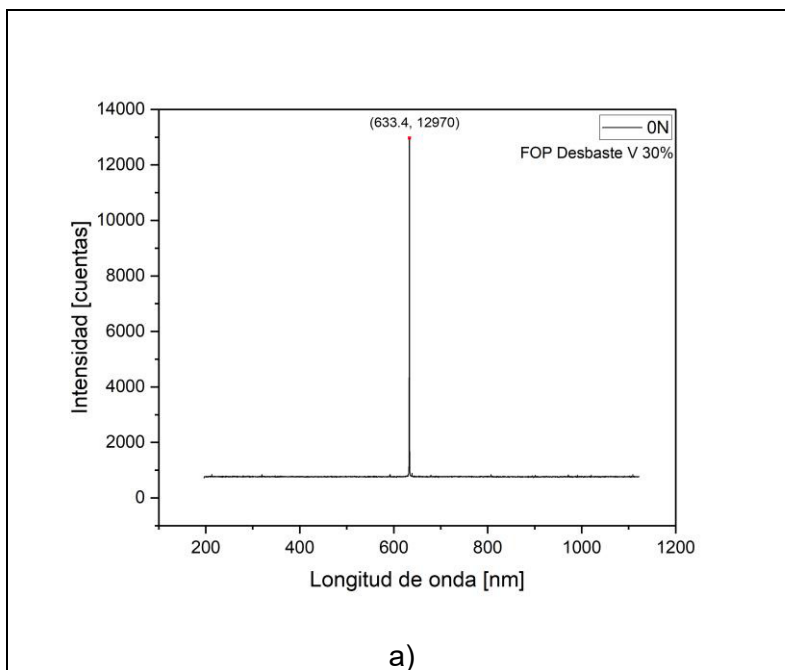


Figura 52. Configuración para el lazo de FOP con desbaste en V al 30% y 50%.

Para esta configuración y con la aplicación de fuerza gradual en un intervalo de (0-500) N sobre el lazo sensor se observó una disminución en la amplitud de potencia [9], obteniéndose valores en un rango de (12970 – 5573) cuentas con una diferencia de $\Delta_{cuentas} = 7397$. Ver figura 53.



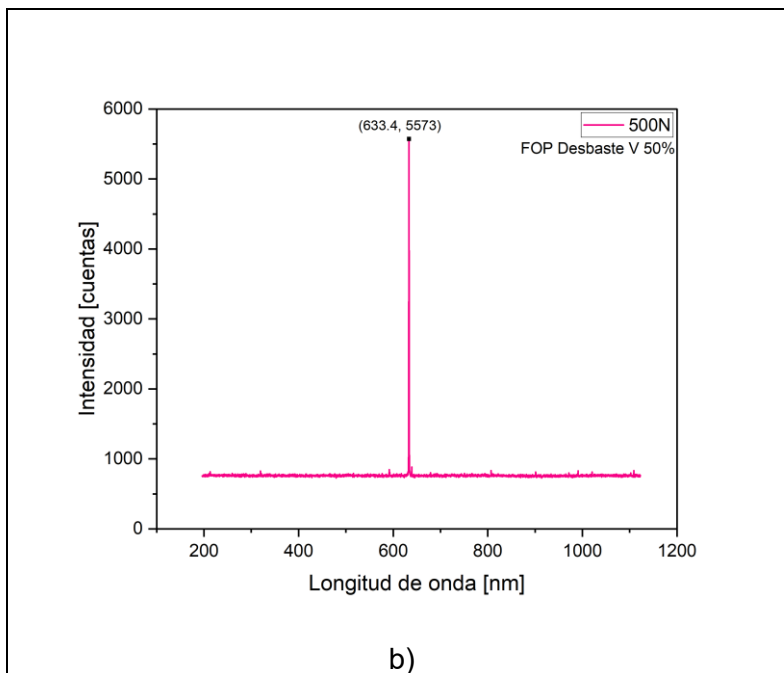


Figura 53. Amplitud espectral resultante del sensor de FOP con desbaste en V al 30% en 0N y b) 500N.

Para revisar de forma más puntual cuanto fue el desplazamiento de los extremos del espectro resultante, con la fuerza aplicada en el intervalo de (0-500) N, se utiliza la figura 54 de donde se observan las lecturas en longitud de onda:

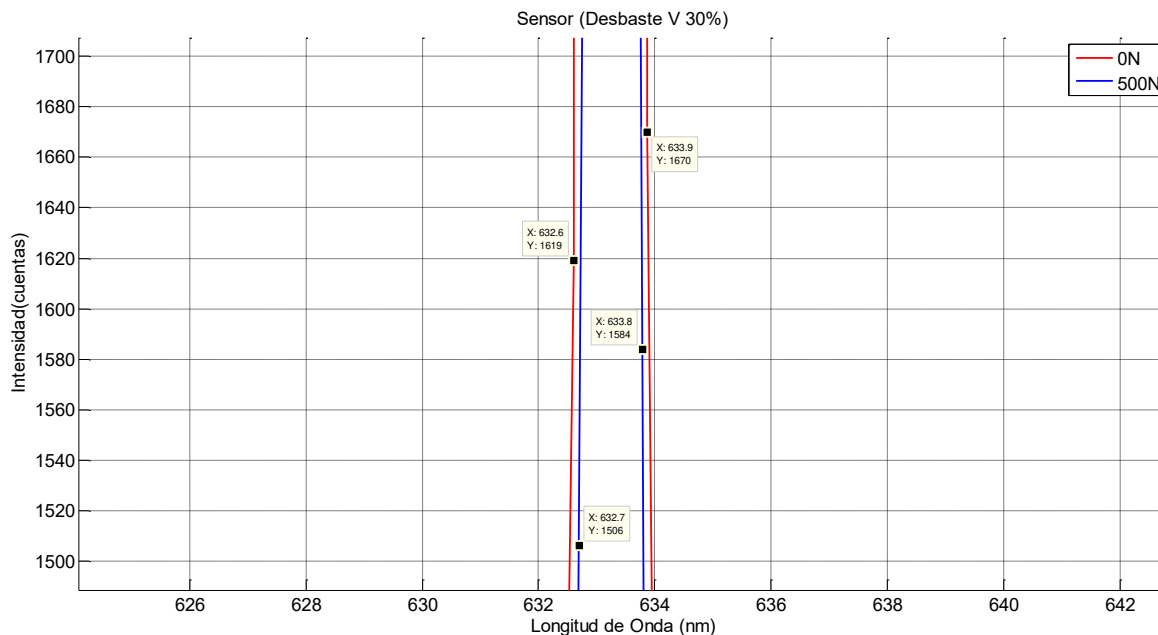


Figura 54. Resultado del desplazamiento de los extremos del espectro en longitud de onda para a) 0N y b) 500N.

Tabla 11. Respuesta del lazo en V con desbaste al 30% en los extremos del espectro láser.

Fuerza Aplicada (N)	λ_0 (nm)	λ_{500} (nm)	$ \Delta\lambda $ (nm)
0	632.6	633.9	1.3
500	632.7	633.8	1.1

Con estas lecturas y las ecuaciones 10 y 11 se obtuvieron los siguientes resultados:

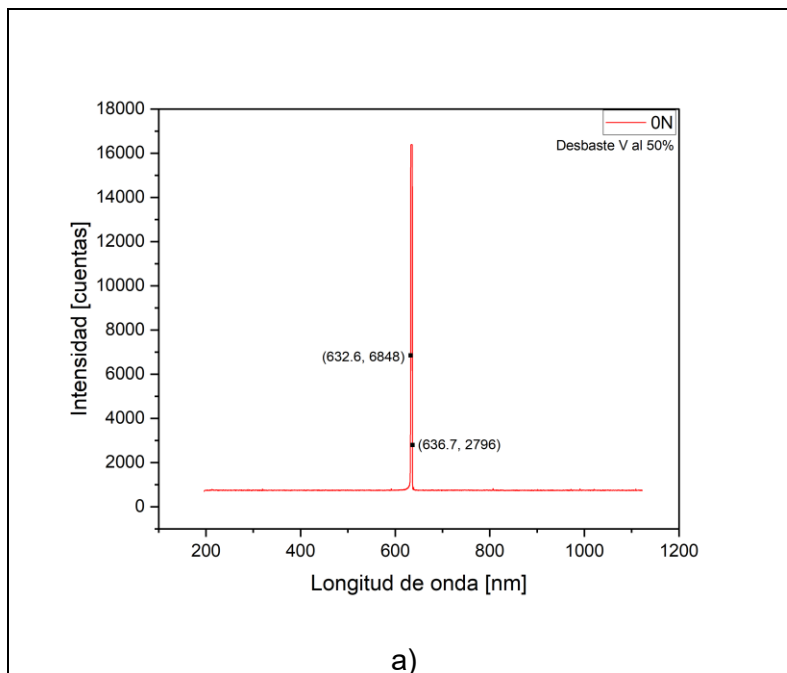
Tabla 12. Resultado del desplazamiento lateral del espectro del lazo al 30% de desbaste.

$\Delta\lambda_{0f}$	0.1nm
$\Delta\lambda_{500f}$	0.1 nm

En cuanto a la potencia detectada durante la medición se obtuvo para el lazo con desbaste V al 30% con la $P(0) = 120\mu W$ y $P(500) = 118.5\mu W$.

4.2.6 Experimento con lazo de FOP con desbaste diametral en V al 50%.

Utilizando el mismo esquema experimental de la figura 43 se acopló un lazo FOP con desbaste en V al 50%. Al aplicar fuerza gradual en el intervalo de (0-500) N se obtuvieron las lecturas en longitud de onda del espectro en $\lambda_{0i} = 632.6 \text{ nm}$ y $\lambda_{0f} = 636.7 \text{ nm}$, así como $\lambda_{500i} = 632.6 \text{ nm}$ y $\lambda_{500f} = 635.9 \text{ nm}$. Ver figura 55.



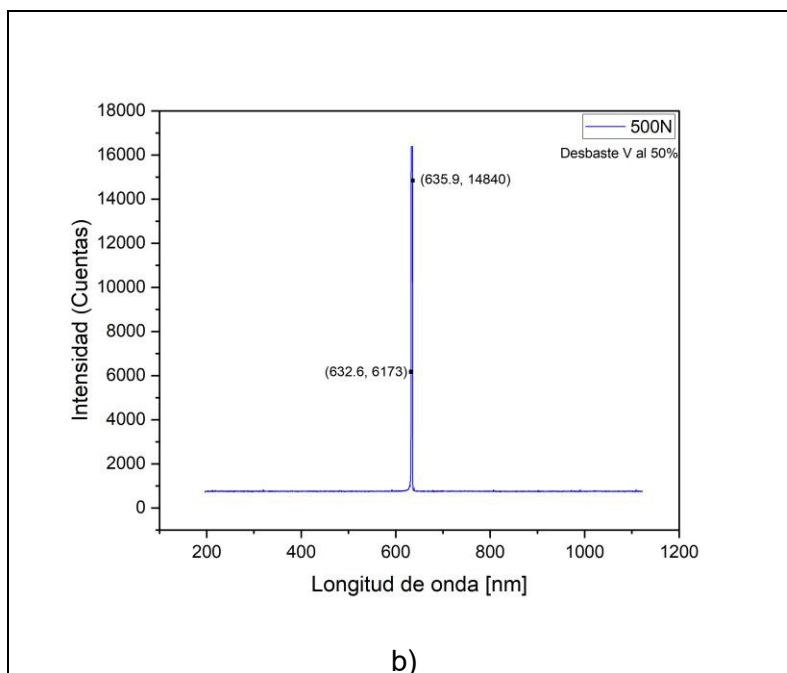


Figura 55. Espectro resultante del sensor desbastado en V al 50% en a) 0N y b) 500N de fuerza.

Tabla 13. Respuesta del lazo en V con desbaste al 50% en los extremos del espectro láser.

Fuerza Aplicada (N)	λ_0 (nm)	λ_{500} (nm)	$ \Delta\lambda $ (nm)
0	632.6	636.7	4.1
500	632.6	635.9	1.1

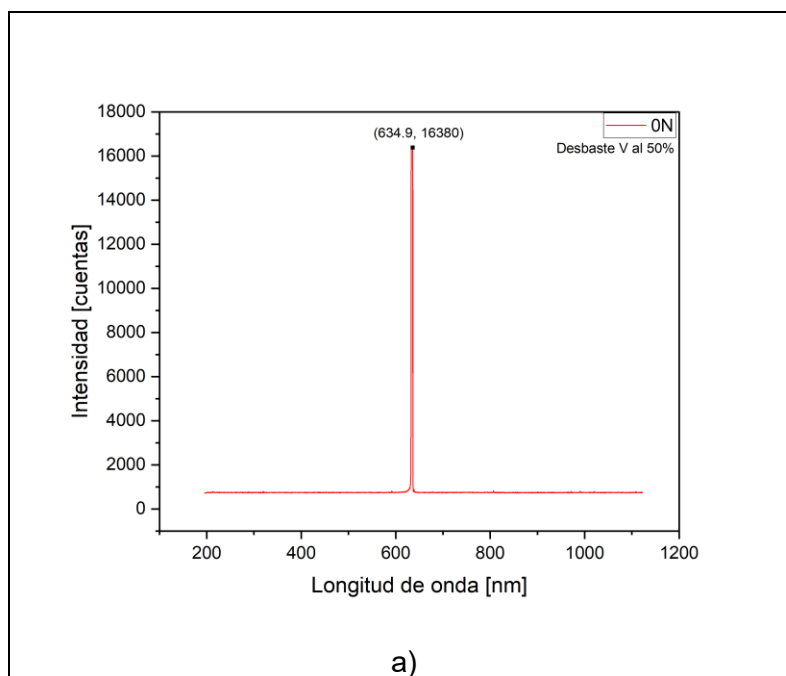
Con estas lecturas y las ecuaciones 10 y 11 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 14. Resultado del desplazamiento lateral del espectro del lazo al 50% de desbaste.

$\Delta\lambda_{0f}$	0nm
$\Delta\lambda_{500f}$	0.8 nm

La potencia registrada con el medidor de potencia para el lazo sensor desbastado en forma de V a 50% es $P(0) = 0.361\mu W$ y $P(500) = 360\mu W$.

Los resultados de la amplitud espectral en el intervalo de (0-500) N en el analizador de espectros resultaron de 16380 y de 16380 cuentas, respectivamente, comprobando que no hay cambio en la amplitud del espectro, lo mismo que se muestra y registra con el analizador de espectros en la figura 56.



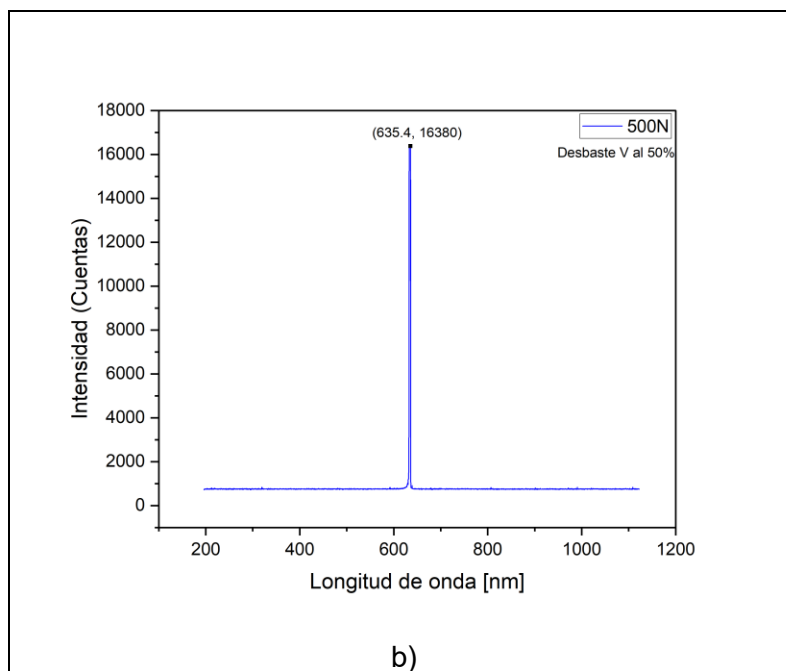


Figura 56. Amplitud del espectro para el sensor de FOP con desbaste en D al 50% para a) 0N y b) 500N.

4.2.7 Análisis de los resultados del comportamiento del lazo sensor de FOP con desbaste en V.

El lazo FOP como sensor de fuerza al 30% y 50% desbaste en V tienen un comportamiento similar cuyo resultado no presenta variación significativa en longitud de onda al aplicar fuerza gradual en un rango de (0-500) N. Se observa que la longitud de onda permanece constante en cierto valor al no aplicar fuerza 0N, así como en 100N, 200N y 500N en donde la lectura es de 1.79nm. Sin embargo, para 300N y 400N se puede observar que la lectura se encuentra en 1.28nm. Por lo que, en términos de sensibilidad, los resultados muestran que la FOP desbastada en V presenta una sensibilidad limitada y en los extremos, siendo menos o insignificamente sensible en longitudes de onda por debajo de 1.8nm en comparación con los desbastes en D que muestran más sensibilidad en un amplio espectro de fuerza en newtons. En la figura 57 inciso b) se puede observar que el desbaste al 50% en V resulta en un comportamiento similar al del inciso a), observándose una mayor sensibilidad en $\Delta\lambda = 2nm$ cuyo rango está entre (200 -500) N.

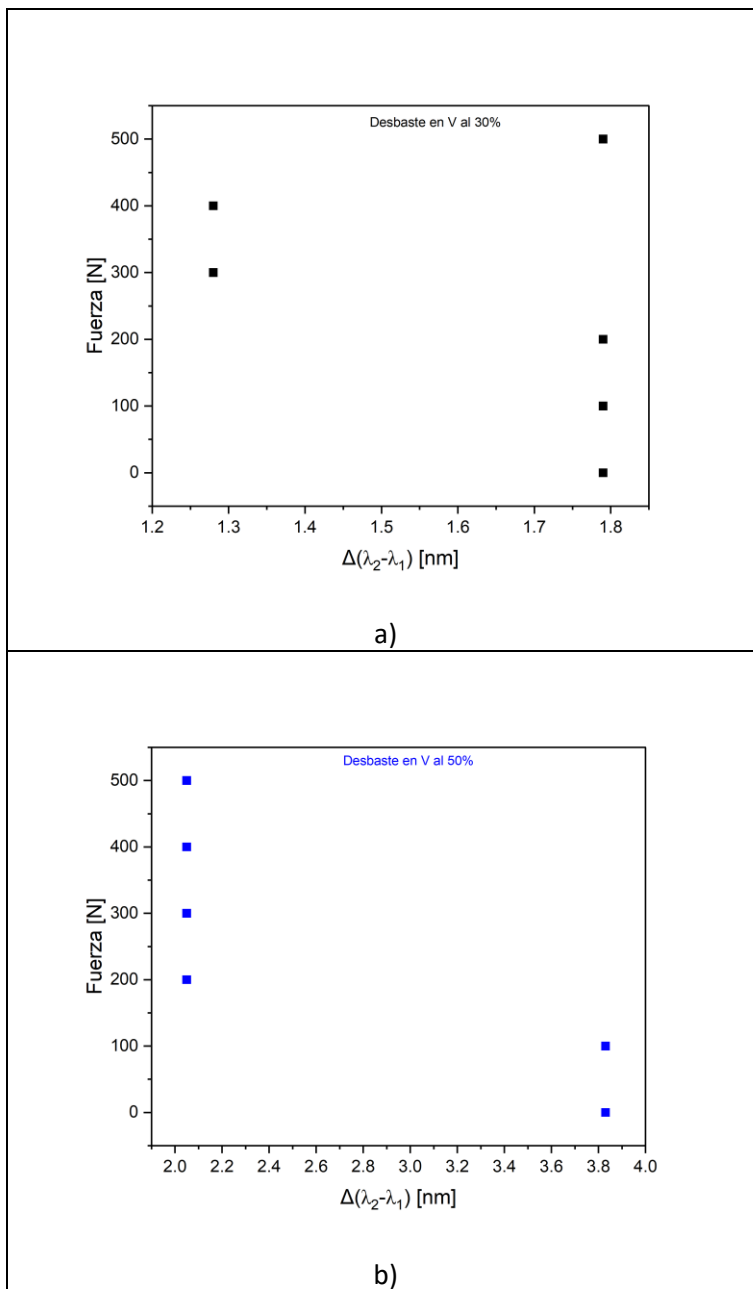


Figura 57. Resultado de la sensibilidad en un $\Delta\lambda$ del sensor de FOP con desbaste V al a) 30% y b) 50%.

4.2.8 Experimento con lazo de FOP con desbaste cilíndrico al 30%.

El resultado de las pruebas con un lazo de FOP con desbaste cilíndrico colocado en el mismo esquema experimental de la figura 43 demostró las siguientes respuestas a la fuerza aplicada.

Tabla 15. Respuesta del lazo con desbaste cilíndrico al 30% en los extremos del espectro láser.

Fuerza Aplicada (N)	λ_0 (nm)	λ_{500} (nm)	$ \Delta\lambda $ (nm)
0	632.6	636.7	4.1
500	632.6	634.6	2

Con estas lecturas y las ecuaciones 10 y 11 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 16. Resultado del desplazamiento lateral del espectro del lazo al 30% de desbaste.

$\Delta\lambda_{0f}$	0nm
$\Delta\lambda_{500f}$	2.1nm

Dado que las gráficas obtenidas se mostraban muy cerradas se abrió el espectro para poder calcular las posiciones inicial y final en longitud de onda, ver figura 58.

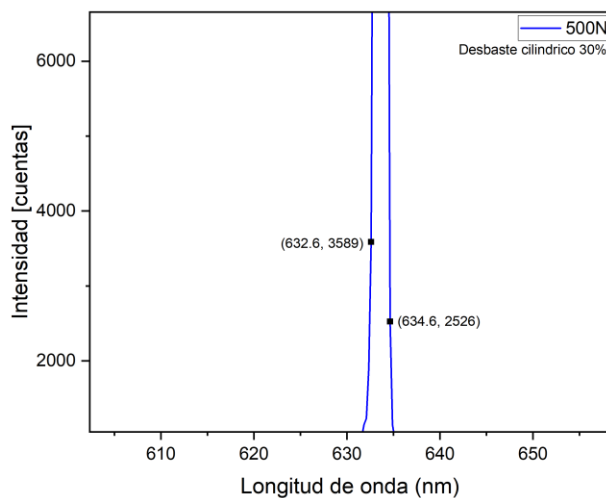


Figura 58. Coordenadas del espectro con los cursores para localizar la longitud inicial y final.

La amplitud se mantiene constante en 16380 cuentas en ambos lazos con desbaste al 30% y 50% como se observa en la figura 59.

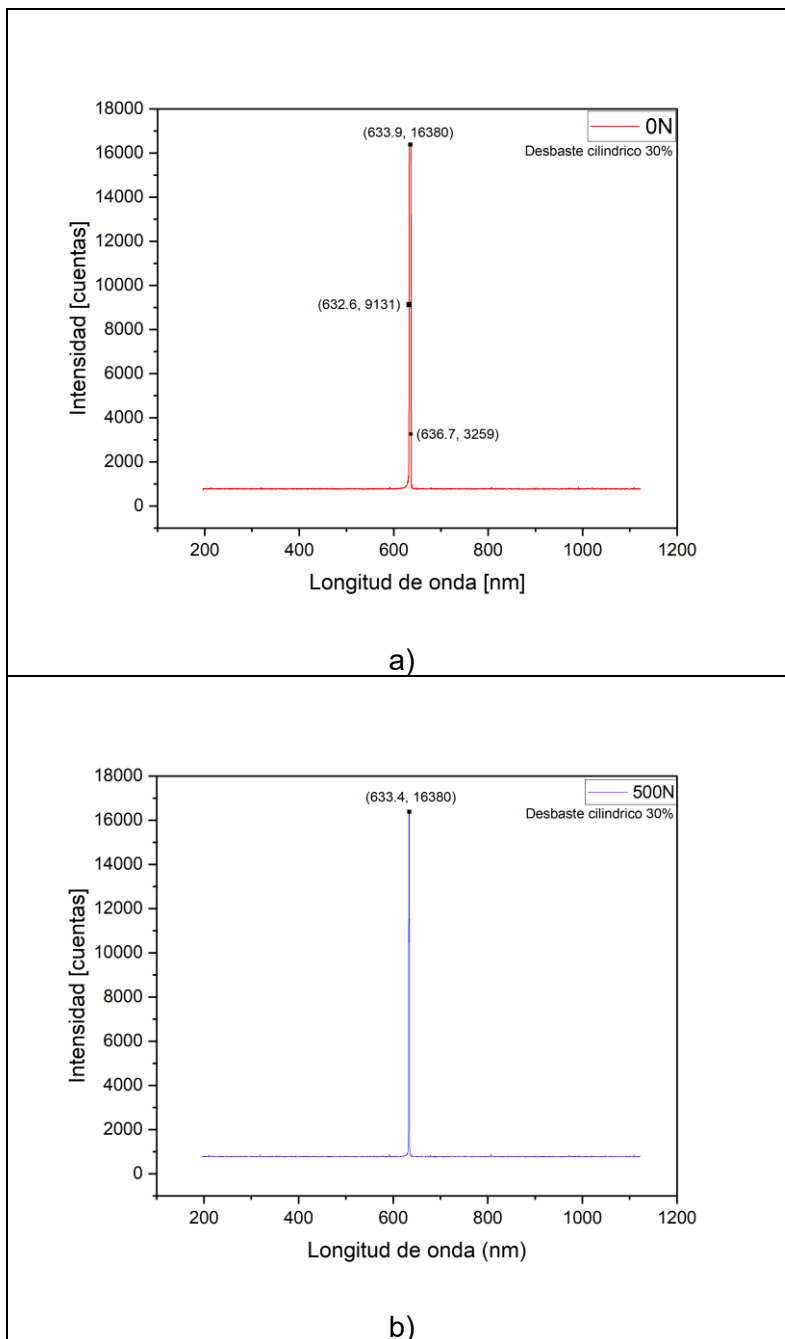


Figura 59. Amplitud del espectro para el sensor de FOP con desbaste cilindrico al 30% para a) 0N y b) 500N.

4.2.9 Resultados del lazo de FOP con desbaste cilíndrico al 50%.

El lazo se mantiene en una longitud de 10 cm y la fuerza se aplica en un intervalo de (0-500) N. El desplazamiento de los extremos del espectro se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 17. Respuesta del lazo con desbaste cilíndrico al 50% en los extremos del espectro láser.

Fuerza Aplicada (N)	λ_0 (nm)	λ_{500} (nm)	$ \Delta\lambda $ (nm)
0	632.3	636.9	4.6
500	632.7	634.5	1.8

Con estas lecturas y las ecuaciones 10 y 11 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 18. Resultado del desplazamiento lateral del espectro del lazo al 50% de desbaste cilíndrico.

$\Delta\lambda_{0f}$	0.4nm
$\Delta\lambda_{500f}$	2.4nm

Las siguientes graficas muestran los resultados del desplazamiento de los extremos del espectro que se obtuvieron en el intervalo entre (0 -500) N. Ver figura 60.

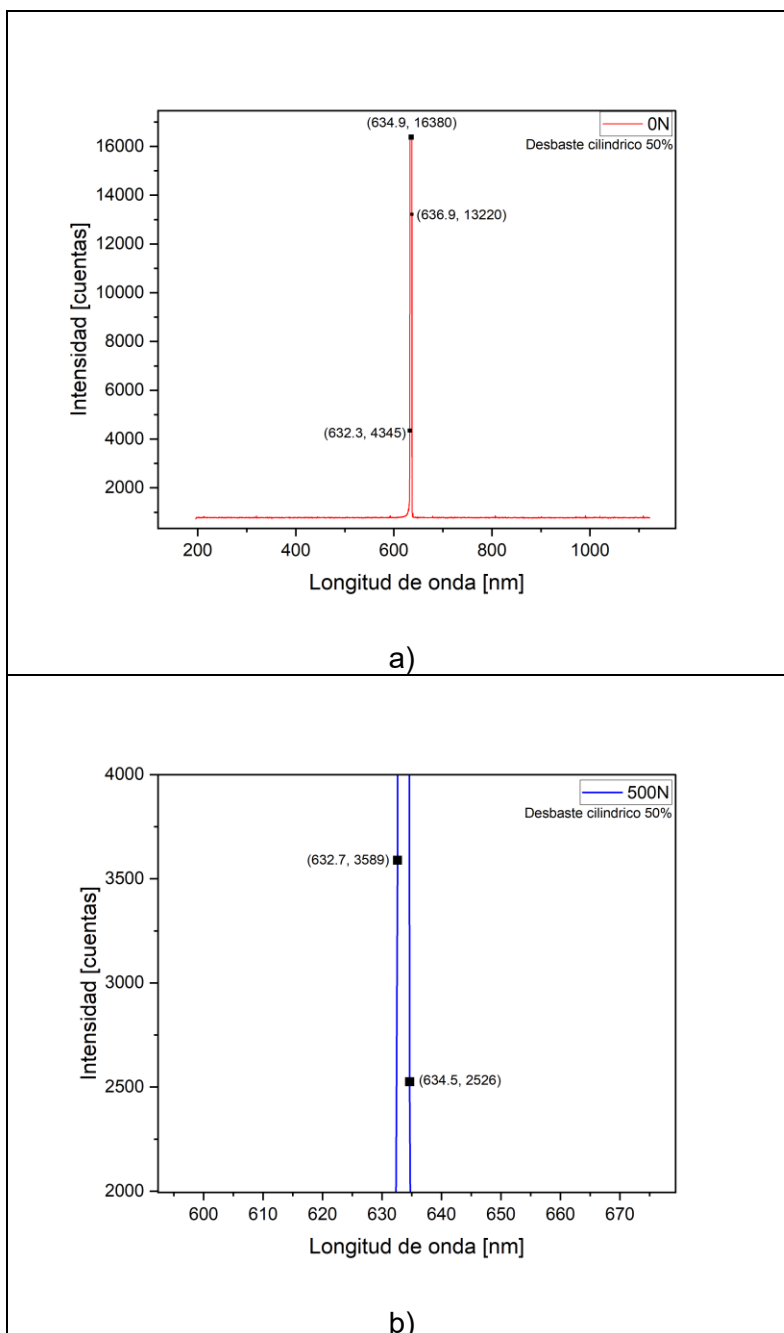
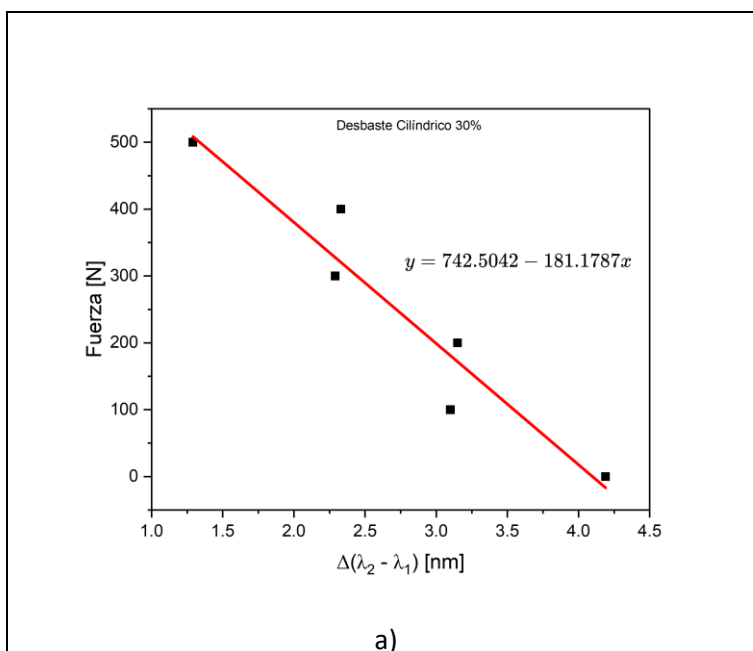


Figura 60. Sensor de fuerza con lazo con desbaste cilíndrico al 50% con a) 0N aplicados y b) 500N aplicados.

La amplitud permaneció constante en 16380 cuentas en el intervalo (0 – 500) N.

4.2.10 Análisis de los resultados del comportamiento del lazo sensor de FOP desbaste cilíndrico al 30% y 50%.

Las gráficas de la figura 61 muestran la respuesta del sensor de la fuerza con el lazo FOP con un desbaste cilíndrico al a) 30% y b) 50% de profundidad. La respuesta de la gráfica del inciso a) muestra una tendencia lineal. En este caso llama la atención que el desplazamiento de los extremos del espectro, en la parte media se ubican alrededor de la misma posición de la abscisa en longitud de onda, pero con una variación del rango de fuerza de 100N, en 2.3nm y 3.1nm para el desbaste del 30%.



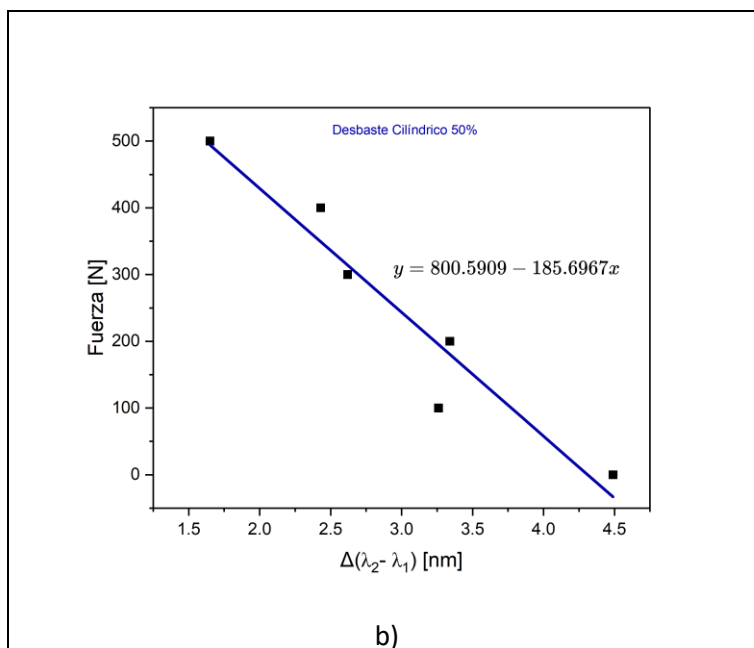


Figura 61. Resultado de la sensibilidad en un $\Delta\lambda$ del sensor de FOP con desbaste cilíndrico al a) 30% y b) 50%.

La gráfica del inciso b) muestra una tendencia de respuesta lineal en donde el desplazamiento de los extremos del espectro en la parte media ya se lee en diferentes abscisas, lo que demuestra que para el caso del desbaste cilíndrico del lazo es más sensible a la fuerza aplicada, por lo que existe más variación o desplazamiento espectral en respuesta a la perturbación.

4.3 Resumen de resultados:

La siguiente tabla resume los resultados obtenidos de las pruebas con lazos de fibra óptica plástica (FOP) de 1mm de diámetro con diferentes desbastes al 30% y 50% de los cuales se observó y registró el desplazamiento espectral en longitud de onda en un rango de fuerza de (0-500) N para determinar su sensibilidad a la fuerza. Se puede observar que los lazos de FOP con mayor respuesta a la sensibilidad son los que tienen un desbaste en forma de D en la superficie, siendo más sensible el desbaste al 30% con $14.2^{pm}/nm$ siguiéndole el desbaste al 50% con $7.2^{pm}/nm$. El tercero más sensible es el lazo con desbaste cilíndrico con $5.6^{pm}/nm$ para el caso de fuerza aplicada en newtons.

Tabla 19. Resumen de resultados de acuerdo con las diferentes pruebas realizadas con los lazos de FOP.

Fuerza(N)	Desbaste	λ_0 (nm)	λ_{500} (nm)	$ \Delta\lambda $ (nm)	$\Delta\lambda_{0f}$	$\Delta\lambda_{500f}$	Potencia	Sensibilidad
0	Sin	631.6	644.1	12.5	0.5nm	2.1 nm	0.936mW	0
500		631.1	642	10.9			0.934mW	
0	D 30%	631.3	643.8	12.5	1	6.1	0.844mW	14.2 pm/nm
500		632.3	637.7	5.4			0.815mW	
0	D 50%	632.3	640.5	8.2	0.3	3.3	0.393mW	7.2 pm/nm
500		632.6	637.2	4.6			0.380mW	
0	V 30%	632.6	633.9	1.3	0.1	0.1	120 μ W	0.4 pm/nm
500		632.7	633.8	1.1			118.5 μ W	
0	V 50%	632.6	636.7	4.1	0	0.8	0.361mW	1.6 pm/nm
500		632.6	635.9	1.1			0.360mW	
0	Cilíndrico 30%	632.6	636.7	4.1	0	2.1	110.5 μ W	4.2 pm/nm
500		632.6	634.6	2			109 μ W	
0	Cilíndrico 50%	632.3	636.9	4.6	0.4	2.4	123.5 μ W	5.6 pm/nm
500		632.7	634.5	1.8			122.3 μ W	

En el siguiente capítulo se mencionarán las conclusiones relacionadas a estos resultados y el impacto que tienen sobre este trabajo de investigación.

Referencias.

- [1] Marín del Toro, A. J. (2015). Caracterización de conmutadores basados en fibras ópticas de plástico y cristal líquido para redes en el hogar.
- [2] Quintela Incera, A., Arribas Lastra, F., Rodríguez Cobo, L., Mirapeix Serrano, J. M., & López Higuera, J. M. (2013). Transductor de temperatura y presión basado en redes de difracción en fibra óptica: diseño, implementación y caracterización. 8ª Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL'13, 2013, Alcalá de Henares, p. 111-115.
- [3] Biswas, D., Ilyashenko, V., & Hulse, G. (1998). *Characterization of plastic optical fiber* (No. 980875). SAE Technical Paper.
- [4] Schartel, B., Wachtendorf, V., & Hennecke, M. (1999). Chemiluminescence: A promising new testing method for plastic optical fibers. *Journal of lightwave technology*, 17(11), 2291.
- [5] Křemenáková, D., Militký, J., Meryová, B., & Lédl, V. (2013). Characterization of side emitting plastic optical fibers light intensity loss. *World Journal of Engineering*, 10(3), 223-228.
- [6] Krehel, M., Rossi, R. M., Bona, G. L., & Scherer, L. J. (2013). Characterization of flexible copolymer optical fibers for force sensing applications. *Sensors*, 13(9), 11956-11968.
- [7] Frazão, O., Baptista, J. M., & Santos, J. L. (2007). Recent advances in high-birefringence fiber loop mirror sensors. *Sensors*, 7(11), 2970-2983.
- [8] Ribeiro, A. L. (1998). Sensores interferométricos em Fibra óptica. *Gaz. de Física, FASC*, 1, 16-21.
- [9] Kulkarni, A., Na, J., Kim, Y., & Kim, T. (2009). The plastic optical fiber cantilever beam as a force sensor. *Microwave and Optical Technology Letters*, 51(4), 1020-1023.

Capítulo 5

V. Conclusiones y trabajo a futuro.

5.1 Conclusiones

De acuerdo al análisis de los resultados obtenidos se afirma que se puede fabricar un sensor de lazo en espejo en fibra óptica de plástico de 1mm de diámetro con diferentes desbastes del 30 y 50% en forma de D, V y cilíndrico, demostrando una mejor sensibilidad en el corte en D al 30%, con una longitud del desbaste de 5mm.

La mejor sensibilidad se obtuvo en el sensor con desbaste en D al 30%, además de ser el desbaste más fácil de realizar. Este cambio diametral presenta menos pérdida de luz por el tipo de corte ya que mantiene un mayor confinamiento modal, por lo tanto, es más amplio el cambio espectral y al contacto con el metal del tornillo que aplica la fuerza sobre el lazo sensor permite una mayor sensibilidad en comparación de los otros cortes estudiados.

Para el sensor con desbaste V se obtuvo mayor pérdida de luz por la falta de control sobre el corte. Este corte es más complicado de hacer debido a la temperatura, que excede la temperatura nominal de la fibra óptica, lo que influye en la falta de simetría del desbaste sobre el diámetro de la fibra óptica. Se recomienda hacer el corte en caliente con un control de temperatura. Para mejores resultados se recomienda trabajar con cortes simétricos con apoyo de un dispositivo fijo como un canal con ranura. En conclusión, este sensor es el que presenta menor sensibilidad por lo cual se requiere mayor investigación en su diseño y fabricación.

Para los sensores con desbastes cilíndricos al 30 y 50% se determina que las pérdidas presentadas se deben al campo evanescente y al material de contacto con el dispositivo de interrogación. Para este caso se recomienda utilizar otro material de contacto para descartar la absorción de la onda electromagnética en el material.

En general se necesitan mejores métodos controlados de fabricación para sensores de fuerza en FOP ya que con esto, se podría demostrar una mayor sensibilidad en la respuesta del sensor con los diferentes desbastes. Se concluye en este trabajo de investigación, que el desbaste en D es la mejor opción para lograr obtener un sensor con mejores características de detección a cambios de la fuerza con respecto a la longitud de onda. En este trabajo no se determinó si la sensibilidad es mayor en el visible o a longitudes de onda mayores a 1200nm y no existe evidencia todavía.

Apéndice A

Publicaciones.

1. Alfredo Murrieta Loyde, Yeraldyn Guzmán Castro, Mónica Trejo Durán, Eduardo Cabal Yépez, Igor Guryev, Ruth Ivonne Mata Chávez. "Diseño y Caracterización de un Sensor de Glucosa en Fibra Óptica Plástica". Academia Journals CDMX 2023. ISSN 1946-5351. Vol. 15, No. 11, 2023.
2. Yeraldyn Guzmán Castro, Alfredo Murrieta Loyde, José Manuel López Villagómez, Mónica Trejo Durán, Carlos Rodríguez Doñate, Igor Guryev, Ruth Ivonne Mata Chávez, "Beam modulation as an intensity force sensor based on plastic optical fiber," Proc. SPIE 13130, Novel Optical Systems, Methods, and Applications XXVII, 131300D (1 October 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3028173>.
3. Yeraldyn Guzmán Castro, Alfredo Murrieta Loyde, José Manuel López Villagómez, Mónica Trejo Durán, Carlos Rodríguez Doñate, Igor Guryev, Ruth Ivonne Mata Chávez. "Sensor de Fuerza con Lazo de Fibra Óptica Plástica". Avances Científicos y Tecnológicos en México. Centro de Investigaciones en Óptica. Tomo VI: Ingeniería ISBN 978-607-8821-48-8. Año 2024.

Congresos.

1. Murrieta Loyde Alfredo, Yeraldyn Guzmán Castro, Trejo Durán Mónica, Guryev Igor, Cabal Yépez Eduardo y Mata Chávez Ruth Ivonne. "Acoplador de Fibra Óptica Plástica como Sensor de Porcentaje de Solutos". Universidad de Guanajuato. DICIS. Departamento de Estudios Multidisciplinarios. LXVI Congreso Nacional de Física. 8-13 octubre 2023. Centro de Convenciones y Exposiciones de Morelia, Michoacán.
2. José Manuel López Villagómez, Ruth Ivonne Mata Chávez, Alfredo Murrieta Loyde, Yeraldyn Guzmán Castro, Carlos Rodríguez Doñate, Igor Guryev. "Glucose sensor with Plastic Fiber Optic coupler". Department of Multidisciplinary Studies University of Guanajuato, Gto., Mexico. International Conference on Applied Electronics and Computers (ICAppLEC 2023).
3. Yeraldyn Guzmán Castro 1, Alfredo Murrieta Loyde 1, José Manuel López Villagómez 1, Mónica Trejo Durán 1, Carlos Rodríguez Doñate 1, Igor Guryev 1 y Ruth Ivonne Mata Chávez. "Sensor de Fuerza con Lazo de Fibra Óptica Plástica". Universidad de Guanajuato. Departamento de Estudios Multidisciplinarios. XX1 Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia. 22-24 mayo 2024. León Guanajuato.

4. Murrieta Loyde Alfredo, Guzmán Castro Yeraldyn, Trejo Durán Mónica, Guryev Igor, Ledesma Carrillo Luis Manuel, Rodríguez Doñate Carlos y Mata Chávez Ruth Ivonne. "Variación del Ancho Espectral del Pico de Potencia Alrededor de 632 nm al Aplicar Fuerza en una Fibra Óptica de Plástico". Universidad de Guanajuato. División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca. Departamento de Estudios Multidisciplinarios. LXVII Congreso Nacional de Física. 6-11 octubre 2024. Chihuahua, México.