UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas

Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicada

Centro de Investigación en ingenierías y Ciencias Aplicadas

Sistemas sensores basados en fibras ópticas adelgazadas incorporando programación gráfica

Tesis para obtener el grado de maestría en ingeniería y ciencias aplicadas

Presenta:

María del Carmen Soto Robles

Director de tesis: Dr. J. Jesús Castrellón Uribe

Codirector de tesis: Dr. Jorge Arturo Sandoval Espino

Cuernavaca, Morelos noviembre 2026

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema detector óptico basado en programación LabVIEW y una tarjeta Arduino para su incorporación en un sensor de fibra óptica. Una fibra óptica adelgazada (**FOA**) comúnmente llamada "*taper de fibra óptica*" (**TFO**) fue utilizada como el transductor del sensor. La fabricación de la microestructura óptica fue a través de la técnica calentamiento-estirado utilizando un quemador oscilante con una pequeña flama. Se investigaron diferentes detectores ópticos comerciales disponibles, de bajo costo, y compatibles con la plataforma de programación.

Los fotodiodos considerados en el estudio fueron de Si y InGaAs en configuración de polarización inversa los cuales se utilizaron para implementar un circuito para la detección de una señal óptica en la región del espectro electromagnético visible (Vis) e infrarrojo cercano (NIR) respectivamente. La señal generada por los fotodiodos fue adquirida a través de una tarjeta Arduino UNO y procesada en tiempo real mediante una interfaz en LabVIEW para visualizar los datos obtenidos. El circuito implementado para el fotodiodo de Si fue diseñado para operar en tres diferentes longitudes de onda 488 nm, 655 nm y 980 nm; mientras que para el fotodiodo de InGaAs fueron a 980 nm, 1310 nm, y 1550 nm.

Finalmente, el sistema detector óptico desarrollado fue integrado a un sensor basado en fibra óptica estrechada para el monitoreo de cambios en el índice de refracción de soluciones acuosas. Como muestras de estudio se emplearon soluciones de sacarosa, glucosa y extracto de jamaica preparadas a diferentes concentraciones, las cuales presentaron distintos índices de refracción, permitiendo evaluar el desempeño y la sensibilidad del sistema propuesto para aplicaciones de sensado óptico.

ÍNDICE

PREFACIO **11**
HIPOTESIS **12**
OBJETIVO GENERAL **12**
OBJETIVOS ESPECÍFICOS 12
JUSTIFICACIÓN **12**

CAPITULO 1: MARCO TEORICO **14**

1.1 RESUMEN **14**
1.2 SENSORES **14**
1.2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SENSORES 15
1.2.2 TIPOS DE SENSORES 17
1.3 SENSORES ÓPTICOS **18**
1.3.1 SENSORES DE FIBRA ÓPTICA 19
1.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SFO 20
1.4 FIBRA ÓPTICA ADELGAZADA (FOA) **23**
1.4.1 ESTRUCTURA DE UNA FOA 23
1.4.2 TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE LAS FOA 25
1.4.3 TÉCNICA DE FUSIÓN POR CALENTAMIENTO ESTIRADO 28
1.4.4 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LAS FOA 29
1.5 FOTODETECTOR **30**
1.6 FOTODIODO **31**
1.6.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN 31
1.6.2 MODOS DE OPERACIÓN 32
1.7 HERRAMIENTAS DE ADQUISIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS **35**
1.7.1 ADQUISICIÓN DE DATOS 35
1.7.2 PLACA ARDUINO 36
1.7.3 PROGRAMACIÓN GRAFICA CON LABVIEW 37
1.7.4 VENTAJAS DE LA INTEGRACIÓN ARDUINO-LABVIEW 37

CAPITULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL **39**

2.1 RESUMEN **39**
2.2 SISTEMA DE DETECCION BASADO EN PROGRAMACIÓN LABVIEW Y UNA TARJETA ARDUINO **39**
2.2.1 DISEÑO DEL CIRCUITO INTEGRADO AL FOTODIODO 39
2.2.2 ADQUISICIÓN DE DATOS MEDIANTE ARDUINO 40
2.2.3 DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA EN LABVIEW 41
2.3 FOTODIODOS (PD) UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACION **42**
A) FOTODIODO SM05PD1A (VIS) 42
- Medición de la potencia óptica de diferentes fuentes de luz con Fotodetector comercial S120VC (Thorlabs) 44

- Validación del sistema de adquisición de voltaje 45
- Mediciones de potencia óptica empleando el sistema de detección propuesto: Fuente + CI+PD-SM05PD1A+Arduino/Interfaz LabVIEW 46

B) FOTODIODO LSIPD-L1-B-0 (NIR) 47

C) FOTODIODO YA302PD (NIR) 48

- Medición de la potencia óptica de la fuente DHL-2000-BAL para 980nm, 1310nm y 1550 nm con PD-DXP-40D 49

2.3.1 MEDICIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA INCORPORANDO EL SISTEMA DE DETECCIÓN PROPUESTO: CI + FOTODIODO LSIPD-L1-B-0 + ARDUINO/LABVIEW 50

2.3.2 MEDICIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA INCORPORANDO EL SISTEMA DE DETECCIÓN PROPUESTO: CI+ FOTODIODO YA302PD + ARDUINO/LABVIEW 51

2.4 SENSOR DE FIBRA OPTICA ADELGAZADA 52

2.4.1 FABRICACIÓN DE LAS MICROESTRUCTURAS 52

2.4.2 CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA 53

2.4.3 RESPUESTA ESPECTRAL DE LAS MICROESTRUCTURAS 54

2.5 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN PROPUESTO EN UN SENSOR DE FIBRA ÓPTICA 54

2.5.1 PREPARACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS 55

a) Sacarosa 55

b) Glucosa 56

c) Jamaica 57

2.5.2 MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE LAS SOLUCIONES PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES 58

2.5.3 MEDICIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LAS DIFERENTES SOLUCIONES ACUOSAS BAJO PRUEBA. 59

2.5.4 MEDICIÓN DE LA RESPUESTA ÓPTICA DEL SISTEMA SENSOR PROPUESTO INCORPORANDO: CI + FOTODIODO + TAPER (SENSOR) + ARDUIDO/LABVIEW PARA LAS DIFERENTES SOLUCIONES BAJO PRUEBA. 59

CAPITULO 3: RESULTADOS 61

3.1 RESUMEN 61

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN BASADO EN PROGRAMACIÓN LABVIEW Y UNA TARJETA ARDUINO 62

3.2.1 DISEÑO DEL CIRCUITO INTEGRADO A LOS FOTODIODOS 62

- Diseño del circuito integrado incorporando los fotodiodos b) LSIPD-L1-B-0 (NIR) y c) YA302PD (NIR) 63

3.2.2 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS 65

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN EN LA REGIÓN (VIS-NIR) 67

3.3.1 RESPUESTA ÓPTICA DE LAS DIFERENTES FUENTES DE LUZ 67

3.3.2 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESPUESTA EN VOLTAJE DEL SISTEMA DE DETECCIÓN CON EL FOTODIODO SM05PD1A PARA 488, 655 Y 980NM. 71

3.3.3 MEDICIONES DE LA POTENCIA ÓPTICA EMPLEANDO EL SISTEMA DE DETECCIÓN PROPUESTO: CI + PD-SM05PD1A + ARDUINO/INTERFAZ LABVIEW 73

3.4 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN EN EL INFRARROJO (NIR) 76
3.4.1 MEDICIONES DE POTENCIA ÓPTICA CON EL CI+PD LSIPD-L1-B-0 76
3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA ADELGAZADA 78
3.5.1 CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA 78
3.5.2 RESPUESTA ESPECTRAL 80
3.6 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN EN UN SENSOR DE FIBRA ÓPTICA ADELGAZADA 83
3.6.1 SENSOR DE FIBRA ÓPTICA PARA SOLUCIONES DE JAMAICA 83
- Respuesta espectral del sistema sensor utilizando el Taper #1 para la detección de solucione acuosas de jamaica 84
- Respuesta óptica del sistema sensor propuesto y desarrollado: 86

CI+PD-SM05PD1A+Taper #1 +Arduino/Interfaz LabView 86
- Comparación de la respuesta óptica: S120VC vs CI+PD SM05PD1A 87

3.6.2 SENSOR DE FIBRA ÓPTICA PARA SOLUCIONES DE GLUCOSA 88
- Índice de refracción de las soluciones 89
- Comparación de la respuesta óptica del sistema sensor: DXP-40D (detector comercial) vs CI+PD YA302PD (sistema detector propuesto) 92

3.6.3 SENSOR DE FIBRA ÓPTICA PARA SOLUCIONES DE SACAROSA 93
- Índice de refracción de las soluciones 93

Comparación de la respuesta óptica a 1550 nm: DXP-40D (detector comercial) vs CI+PD YA302PD (sistema propuesto) 97

CAPITULO 4: SUMARIO/CONCLUSIONES 98

REFERENCIAS 100

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 DIAGRAMA ESTRUCTURA BÁSICA DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA. 20
FIGURA 1.2 DIAGRAMA CONFIGURACIONES DE UN SENSOR DE FIBRA ÓPTICA: A) SENSOR INTRÍNSECO Y B) SENSOR EXTRÍNSECO. 21
FIGURA 1.3 REGIONES DE LA ESTRUCTURA BÁSICA DE UNA FIBRA ÓPTICA ADELGAZADA. 24
FIGURA 1.4 DIAGRAMA DE LA ZONA DE TRANSICIÓN EN UN TAPER [22]. 24
FIGURA 1.5 DIAGRAMA DE UN FILAMENTO EN FORMA DE OMEGA INVERTIDA [23]. 26
FIGURA 1.6 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA DE FUSIÓN POR CALENTAMIENTO ESTIRADO. 28
FIGURA 1.7 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LAS FIBRAS ÓPTICAS ADELGAZADAS. 29
FIGURA 1.8. COMPARACIÓN DE LA RESPONSIVIDAD Y LA EFICIENCIA CUÁNTICA EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA PARA FOTODIODOS CONSTRUIDOS CON DIFERENTES MATERIALES [32]. 31
FIGURA 1.9. DIAGRAMA ESTRUCTURA DE UN FOTODIODO DE UNIÓN PIN [32]. 32
FIGURA 1.10. CONFIGURACIONES DE POLARIZACIÓN INVERSA DE UN FOTODIODO: A) TIPO A, CON EL CÁTODO CONECTADO A TIERRA, Y B) TIPO B, CON EL ÁNODO CONECTADO A TIERRA. 33
FIGURA 1.11 CIRCUITO INTEGRADO AL FOTODIODO [34] 34
FIGURA 1.12. PLACA ARDUINO MODELO UNO [49]. 36
FIGURA 2.1. CIRCUITO INTEGRADO AL FOTODIODO. 40
FIGURA 2.2. ENTRADAS Y SALIDAS A LA PLACA ARDUINO. 40
FIGURA 2.3. CONEXIONES ENTRE LA PLACA ARDUINO Y EL CIRCUITO INTEGRADO AL FOTODIODO. 41
FIGURA 2.4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN ARDUINO–LABVIEW PARA LA MEDICIÓN DE POTENCIA ÓPTICA. 42
FIGURA 2.5. RENSPONSIVIDAD DEL FOTODIODO SM05PD1A. 43
FIGURA 2.6. DIAGRAMA ARREGLO EXPERIMENTAL PARA MEDICIONES DE POTENCIA DE LAS FUENTES A UTILIZAR. 44
FIGURA 2.7. ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE VOLTAJE V_L CON MULTÍMETRO. 45
FIGURA 2.8. ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE VOLTAJE V_L CON ARDUINO. 45
FIGURA 2.9. PANEL FRONTAL PARA LA VISUALIZACIÓN DE LA MEDICIÓN DE VOLTAJE MEDIANTE ARDUINO CON INTERFAZ EN LABVIEW. 46
FIGURA 2.9. PANEL FRONTAL PARA LA VISUALIZACIÓN DE LA MEDICIÓN DE VOLTAJE MEDIANTE ARDUINO CON INTERFAZ EN LABVIEW. 46
FIGURA 2.11. RESPONSIVIDAD DEL FOTODIODO MODELO LSIPD-L1-B-0. 48
FIGURA 2.12. RRESPONSIVIDAD CORRESPONDIENTE AL FOTODIODO MODELO YA302PD. 48
FIGURA 2.13. DIAGRAMA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE POTENCIA CON EL DETECTOR DXP-40D. 50
FIGURA 2.14. FOTOGRAFÍA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE POTENCIA CON EL DETECTOR DXP-40D. 50
FIGURA 2.15. DIAGRAMA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE POTENCIA ÓPTICA CON EL FOTODIODO LS1PD-L1-B-0 (NIR). 51
FIGURA 2.16. DIAGRAMA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE POTENCIA ÓPTICA CON EL FOTODIODO YA302PD (NIR). 51

FIGURA 2.17. FIBRA ÓPTICA COLOCADA EN EL SISTEMA DE CALENTAMIENTO ESTIRADO PARA ADELGAZARLA. 53
FIGURA 2.17. FIBRA ÓPTICA COLOCADA EN EL SISTEMA DE CALENTAMIENTO ESTIRADO PARA ADELGAZARLA. 53
FIGURA 2.19. FOTOGRAFÍA DE UNA FIBRA ÓPTICA ADELGAZADA OBTENIDA DURANTE EL PROCESO DE FABRICACIÓN PARA UNA CINTURA DE 30μM. 54
FIGURA 2.20. DIAGRAMA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE ESPECTROS PARA LAS DIFERENTES FIBRAS ÓPTICAS ESTRECHADAS..... 54
FIGURA 2.21. AGITACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE SACAROSA MEDIANTE AGITADOR MAGNÉTICO DURANTE EL PROCESO DE PREPARACIÓN DE LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES..... 55
FIGURA 2.22. MUESTRAS DE SOLUCIONES DE SACAROSA PREPARADAS A DIFERENTES CONCENTRACIONES: 100 %, 75 %, 50 % Y 25 %..... 56
FIGURA 2.24. MUESTRAS DE SOLUCIONES DE GLUCOSA PREPARADAS A DIFERENTES CONCENTRACIONES: 100 %, 75 %, 50 % Y 25 %..... 57
FIGURA 2.23. CALENTAMIENTO CONTROLADO DE LAS SOLUCIONES DE GLUCOSA MEDIANTE UNA PARRILLA CON AGITACIÓN MAGNÉTICA PARA FAVORECER SU DISOLUCIÓN..... 57
FIGURA 2.25. SOLUCIONES ACUOSAS OBTENIDAS DE DIFERENTES CONCENTRACIONES DE JAMAICA..... 58
FIGURA 2.26. REFRACTÓMETRO (POCKET PAL-BX/RI). 58
FIGURA 2.27. DIAGRAMA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE ESPECTROS PARA LAS DIFERENTES SOLUCIONES BAJO PRUEBA. 59
FIGURA 2.28. DIAGRAMA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE POTENCIA ÓPTICA EN DIFERENTES SOLUCIONES BAJO PRUEBA..... 60
FIGURA 2.29. FOTOGRAFÍA DEL MONTAJE EXPERIMENTAL EN EL LABORATORIO PARA LA MEDICIÓN DE POTENCIA ÓPTICA EN LAS DIFERENTES SOLUCIONES. 60
FIGURA 3.1. CIRCUITO INTEGRADO AL FOTODIODO SM05PD1A. 62
FIGURA 3.2. CIRCUITO INTEGRADO A LOS FOTODIODOS LSIPD-L1-B-0 (NIR) Y YA302PD (NIR). 64
FIGURA 3.3. CONEXIÓN ENTRE EL CIRCUITO INTEGRADO AL FOTODIODO Y LA PLACA ARDUINO UNO. 66
FIGURA 3.4. DIAGRAMA DE BLOQUES EN LABVIEW PARA LA ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN EN TIEMPO REAL DE LA SEÑAL DEL FOTODIODO. 66
FIGURA 3.5. PANEL FRONTAL DE LA INTERFAZ DISEÑADA EN LABVIEW. 67
FIGURA 3.6. FOTOGRAFÍA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL IMPLEMENTADO PARA MEDICIONES DE POTENCIA DEL DIODO LASER DL5147-042 QUE EMITE A Λ=655 NM. 68
FIGURA 3.7. POTENCIA ÓPTICA MEDIDA DEL DIODO LASER 980 NM UTILIZANDO EL FOTODETECTOR S120VC. 69
FIGURA 3.8. POTENCIA ÓPTICA MEDIDA DEL DIODO LASER A 655 NM UTILIZANDO EL FOTODETECTOR S120VC. 69
FIGURA 3.9. POTENCIA ÓPTICA MEDIDA DEL LÁSER DE ESTADO SÓLIDO 488 NM UTILIZANDO EL FOTODETECTOR S120VC..... 70
FIGURA 3.10. VOLTAJE DE SALIDA VL REGISTRADO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA INCIDENTE DE UN DIODO LÁSER A Λ=980 NM. 72
FIGURA 3.11. VOLTAJE DE SALIDA VL REGISTRADO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA INCIDENTE PARA Λ=655 NM. 72
FIGURA 3.12. VOLTAJE DE SALIDA VL REGISTRADO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA INCIDENTE PARA Λ=488 NM. 73

FIGURA 3.13. FOTOGRAFÍA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL IMPLEMENTADO PARA LAS MEDICIONES DE POTENCIA UTILIZANDO EL CI+DETECTOR SM05PD1A, EL ARDUINO Y LA INTERFAZ GRÁFICA EN LABVIEW. 74
FIGURA 3.14. POTENCIA ÓPTICA MEDIDA DEL LÁSER A 980 NM. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE DETECCIÓN PROPUESTO Y EL DETECTOR MODELO S120VC 74
FIGURA 3.15. POTENCIA ÓPTICA MEDIDA DEL LÁSER A 655 NM. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE DETECCIÓN PROPUESTO Y EL DETECTOR MODELO S120VC 75
FIGURA 3.16. POTENCIA ÓPTICA MEDIDA DEL LÁSER A 488 NM. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE DETECCIÓN PROPUESTO Y EL DETECTOR MODELO S120VC 75
FIGURA 3.17. COMPARACIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA DE LA FUENTE DHL-2000-BAL MEDIDA CON EL DETECTOR DXP-40D Y EL SISTEMA DE DETECCIÓN CI+PD LSIPD-L1-B-0 PARA LONGITUDES DE ONDA DE 980, 1310 Y 1550 NM. 77
FIGURA 3.18. PERFIL GEOMÉTRICO DEL TAPER #1 UTILIZADO PARA LAS MEDICIONES EN LA REGIÓN VISIBLE. 79
FIGURA 3.19. GRAFICA PERFIL GEOMÉTRICO DEL TAPER #2 UTILIZADO PARA LAS MEDICIONES EN LA REGIÓN NIR. 79
FIGURA 3.20. GRAFICA PERFIL GEOMÉTRICO DEL TAPER #3 UTILIZADO PARA LAS MEDICIONES EN LA REGIÓN NIR. 80
FIGURA 3.21. RESPUESTA ESPECTRAL EN LA REGIÓN VISIBLE DEL TAPER #1 COMPARADA CON LA FIBRA ÓPTICA MULTIMODO (FMM) SIN ADELGAZAR. 81
FIGURA 3.22. RESPUESTA ESPECTRAL EN LA REGIÓN NIR DEL TAPER #2 COMPARADA CON LA FIBRA ÓPTICA MULTIMODO (FMM) SIN ADELGAZAR. 81
FIGURA 3.23. RESPUESTA ESPECTRAL EN LA REGIÓN NIR DEL TAPER #3 COMPARADA CON LA FIBRA ÓPTICA MULTIMODO (FMM) SIN ADELGAZAR. 82
FIGURA 3.24. RESPUESTA ESPECTRAL DEL SISTEMA SENSOR ÓPTICO UTILIZANDO EL TAPER #1 PARA DIFERENTES ÍNDICES DE REFRACCIÓN DE LAS SOLUCIONES ACUOSAS DE JAMAICA. 85
FIGURA 3.25. RESPUESTA ESPECTRAL NORMALIZADA DEL SISTEMA SENSOR ÓPTICO CON EL TAPER #1 PARA DIFERENTES ÍNDICES DE REFRACCIÓN DE LAS SOLUCIONES ACUOSAS DE JAMAICA. REFERENCIA DE NORMALIZACIÓN AIRE. 85
FIGURA 3.26. POTENCIA ÓPTICA MEDIDA CON EL SISTEMA DE DETECCIÓN CI+PD SM05PD1A + TAPER #1 PARA DIFERENTES ÍNDICES DE REFRACCIÓN DE LAS SOLUCIONES ACUOSAS DE JAMAICA CONSIDERANDO LONGITUDES DE ONDA DE 525, 532, 575 Y 600 NM. 86
FIGURA 3.27. POTENCIA ÓPTICA MEDIDA CON EL FOTODETECTOR COMERCIAL S120VC DE THORLABS PARA DIFERENTES ÍNDICES DE REFRACCIÓN DE LAS SOLUCIONES ACUOSAS DE JAMAICA PARA LAS LONGITUDES DE ONDA DE 525, 532, 575 Y 600 NM. 88
FIGURA 3.28. RESPUESTA ESPECTRAL DEL SISTEMA SENSOR ÓPTICO UTILIZANDO EL TAPER #2 PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE LAS SOLUCIONES ACUOSAS DE GLUCOSA 90
FIGURA 3.29. RESPUESTA ESPECTRAL NORMALIZADA DEL SISTEMA SENSOR ÓPTICO CON EL TAPER #2 PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE SOLUCIONES ACUOSAS DE GLUCOSA. REFERENCIA DE NORMALIZACIÓN AIRE. 90
FIGURA 3.30. POTENCIA ÓPTICA MEDIDA CON EL SISTEMA DE DETECCIÓN CI+PD YA302PD + TAPER #2 PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE GLUCOSA PARA LONGITUDES DE ONDA DE 1310, 1450, 1490 Y 1550 NM. 91

FIGURA 3.31. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA ÓPTICA DEL SISTEMA SENSOR: A) MEDIDA CON EL DETECTOR COMERCIAL DXP-40D Y B) MEDIDA CON EL SISTEMA DE DETECCIÓN PROPUESTO CI + PD YA302PD; UTILIZANDO EL TAPER #2 PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE GLUCOSA PARA LON 92
FIGURA 3.32. RESPUESTA ESPECTRAL DEL SISTEMA SENSOR ÓPTICO UTILIZANDO EL TAPER #3 PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE SOLUCIONES ACUOSAS DE SACAROSA. 94
FIGURA 3.33. RESPUESTA ESPECTRAL NORMALIZADA DEL SISTEMA SENSOR ÓPTICO CON EL TAPER #3 PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE SACAROSA. REFERENCIA DE NORMALIZACIÓN AIRE. 95
FIGURA 3.34. POTENCIA ÓPTICA MEDIDA CON EL SISTEMA DE DETECCIÓN CI+PD YA302PD + TAPER #3 PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE SACAROSA PARA LONGITUDES DE ONDA DE 1450 Y 1550 NM. 96
FIGURA 3.35. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA ÓPTICA DEL SISTEMA SENSOR PARA A) MEDIDA CON EL DETECTOR COMERCIAL DXP-40D Y B) MEDIDA CON EL SISTEMA DE DETECCIÓN PROPUESTO CI + PD YA302PD; UTILIZANDO EL TAPER #3 PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE SACAROSA A 1 97

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1. APLICACIONES DE FIBRAS ÓPTICAS ADELGAZADAS FABRICADAS MEDIANTE DIFERENTES TÉCNICAS PARA LA MEDICIÓN DE DIVERSAS MAGNITUDES. 30
TABLA 2.1. ESPECIFICACIONES DEL FOTODIODO SM05PD1A. 43
TABLA 2.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL FOTODIODO MODELO LSIPD-L1-B-0. 47
TABLA 2.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL FOTODIODO MODELO YA302PD. 49
TABLA 3.1. VALORES CALCULADOS DE RESISTENCIA DE CARGA PARA EL FOTODIODO SM05PD1A A LAS DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA DE OPERACIÓN. 63
TABLA 3.2. VALORES DE RESISTENCIA DE CARGA CALCULADOS EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA, RESPONSIVIDAD Y POTENCIA ÓPTICA MÁXIMA ESTABLECIDA PARA EL FOTODIODO LSIPD-L1-B-0 (NIR). 64
TABLA 3.3. VALORES DE LAS RESISTENCIAS DE CARGA CALCULADOS EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA, RESPONSIVIDAD Y POTENCIA ÓPTICA MÁXIMA ESTABLECIDA EL FOTODIODO YA302PD (NIR). 65
TABLA 3.4. COMPARACIÓN DE LA POTENCIA ÓPTICA MEDIDA CON: EL MEDIDOR DE POTENCIA ÓPTICA MODELO DXP-40D, EL SISTEMA DE DETECCIÓN PROPUESTO CI+PD LSIPD-L1-B-0, Y EL ERROR RELATIVO OBTENIDO PARA LAS LONGITUDES DE ONDA DE 980, 1310 Y 1550 NM. 77
TABLA 3.5. DIMENSIONES OBTENIDAS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS ADELGAZADAS FABRICADAS. 78
TABLA 3.6. CONDICIONES DE PREPARACIÓN E ÍNDICES DE REFRACCIÓN DE LAS MUESTRAS ACUOSAS DE JAMAICA. 84
TABLA 3.7. ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE LAS SOLUCIONES ACUOSAS DE GLUCOSA PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES. 89
TABLA 3.8. ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE LAS SOLUCIONES ACUOSAS DE SACAROSA PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES. 93

PREFACIO

Hoy en día, la investigación y desarrollo de novedosos dispositivos sensores basados en fibra óptica ha extendido su aplicación en diferentes áreas del conocimiento y en diversos campos tecnológicos. Los sensores de fibra óptica ofrecen una serie de ventajas tales como una mayor sensitividad en comparación con las técnicas existentes; así como una versatilidad geométrica, que permite la configuración en formas arbitrarias y la capacidad de realizar la detección remota. Debido a que los sensores de fibra óptica son dispositivos dieléctricos, estos pueden usarse en entornos de alto voltaje, alta temperatura o corrosivos. La señal generada por estos sensores ópticos es útil para fines de medición, monitoreo, recopilación de información y control de procesos entre otros [1].

Los componentes básicos de un sensor de fibra óptica son una fuente óptica, un transductor y un receptor. Los láseres, diodos y/o LED se utilizan a menudo como fuente óptica en estos dispositivos. Una fibra óptica (unimodal o multimodo) y/o fibras dopadas se emplean como transductor. A la salida del sistema sensor, se utiliza un fotodetector para detectar la variación en la señal óptica que es causada por la perturbación física externa del sistema. Los fotodetectores o detectores ópticos son dispositivos optoelectrónicos que convierten la radiación óptica (fotones) en una señal eléctrica (electrones) [2-4]. Por tanto, el sistema de detección es una parte fundamental del sensor, ya que permite transformar la respuesta óptica en una señal susceptible de adquisición, procesamiento y análisis.

Por otro lado, las fibras ópticas estrechadas (*taper de fibra óptica o TFO*) con diámetros micrométricos (menores a 125 μm) han mostrado gran potencial para aplicaciones en sensado óptico [5-6]. En estas microestructuras, parte de la energía es guiada a través de la fibra en forma de onda evanescente. Cuando se producen cambios de índice de refracción en el entorno externo al TFO, estas ondas experimentan un cambio espectral y/o de intensidad proporcional a la perturbación externa; lo cual hace a estas microestructuras ideales para el desarrollo de sensores con alta sensitividad [7-8].

Para aprovechar la respuesta óptica de estas microestructuras, es necesario contar con un sistema capaz de detectar y registrar las variaciones de la señal. La instrumentación electrónica y las herramientas de programación permiten desarrollar sistemas de adquisición y visualización de datos que facilitan el análisis de las mediciones. La integración de Arduino y LabVIEW constituye una alternativa para adquirir señales eléctricas, procesar los datos y presentar los resultados mediante una interfaz gráfica. Asimismo, la selección del fotodetector y el diseño del circuito de acondicionamiento deben considerar las características de la radiación que se desea medir y los requerimientos del sistema [9].

Por lo anterior, el principal objetivo de este proyecto es fabricar microestructuras sensoras basadas en fibra ópticas adelgazadas a través de la técnica de fusión por calentamiento estirado [8, 10-12]; además de investigar y desarrollar un sistema detector óptico basado en

programación LabVIEW [13] y sistemas Arduino [14]. Se investigarán diferentes detectores de radiaciones ópticas comercialmente disponibles y compatibles con los sistemas y plataformas de programación bajo estudio. La sensitividad espectral de los sistemas detectores propuestos incluye la región visible y la región del infrarrojo cercano (Vis-NIR) del espectro electromagnético.

HIPOTESIS

La integración de un sistema de detección óptica de bajo costo, basado en Arduino y LabVIEW, permitirá detectar y evaluar la respuesta de sensores de fibra óptica adelgazada ante variaciones del índice de refracción del medio.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema detector óptico (**SDO**) basado en Programación LabVIEW y sistemas Arduino incorporando sistemas sensores basados en fibras ópticas adelgazadas (**SS-FOA**).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar un sistema detector óptico (**SDO**) basado en programación LabVIEW y sistemas Arduino para su incorporación en sistemas sensores basados en fibra óptica.

2. Fabricar y caracterizar microestructuras sensoras basadas en fibras ópticas adelgazadas a través de la técnica de fusión por calentamiento estirado, para la detección de diferentes magnitudes físicas.

3. Implementar un sistema sensor basado en **FOA** con la incorporación de instrumentación gráfica como el sistema de detección.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente, existe la necesidad de desarrollar factibles sistemas sensores ópticos para el monitoreo de diversas magnitudes físicas como la temperatura, presión, curvatura, índice de refracción, color, radiación, concentración e intensidad entre otras. En esta dirección, las características intrínsecas de los sensores basados en fibra óptica resuelven partes de las necesidades de medición y monitoreo.

Por otro lado, los instrumentos utilizados en el laboratorio para procesar y monitorear los datos provenientes del sensor de fibra óptica (corazón del sensor) son fotodetectores y espectrómetros los cuales son utilizados en condiciones controladas de laboratorio. Sin embargo, el costo de estos instrumentos para aplicaciones reales en campo es prohibitivo; lo

cual conduce a la necesidad de investigar alternativas con un desempeño equivalente, efectivas y de bajo coste para ser utilizadas en aplicaciones.

Con base a lo anterior, la investigación de sistemas sensores basados en fibra óptica adelgazada **SS-FOA** aunado a la incorporación de un sistema de detección óptico basado en programación gráfica conducirá a desarrollar tecnología de **SS-FOA** con viabilidad de implementación, alto desempeño y con bajo coste para aplicaciones en diversos campos tecnológicos.

CAPITULO 1: MARCO TEORICO

1.1 RESUMEN

En este capítulo se presentan los principales conceptos teóricos para comprender el funcionamiento de los sistemas sensores basados en fibras ópticas adelgazadas (SS-FOA). Se inicia con el concepto de lo que es un sensor como se clasifican estos seguido de la descripción de los sensores de fibra óptica, sus componentes básicos y las ventajas que ofrecen frente a otros tipos de sensores.

En seguida, se presenta el concepto de fibras ópticas adelgazadas se describen las regiones características de estas fibras (zona de transición y cintura), y la técnica de fabricación de nuestro interés: fusión por calentamiento–estirado, que permite la fabricación de microestructuras con geometrías controladas. Se describe el principio de transmisión mediante ondas evanescentes y los parámetros geométricos más relevantes para su aplicación como sensores ópticos.

Posteriormente, se abordan los conceptos de fotodetector y fotodiodo, dispositivos esenciales para la conversión de señales ópticas en eléctricas. Se analizan sus principios de operación, parámetros de responsividad y modos de funcionamiento, destacando su relevancia en la detección de variaciones de potencia óptica.

Finalmente, se introduce el tema de la integración de Arduino y LabVIEW como herramientas de adquisición y visualización de datos. Mostrando sus ventajas en términos de flexibilidad, escalabilidad y bajo costo, así como su papel en la construcción de sistemas experimentales de monitoreo en tiempo real.

1.2 SENSORES

Los sensores son dispositivos transductores que responden a las variaciones de una magnitud física generando una señal útil para fines de medición, adquisición de datos y control de procesos. Su función consiste en detectar cambios en el entorno y convertirlos en una señal que pueda ser interpretada por un sistema de procesamiento o adquisición de datos [15].

En la actualidad, los sensores desempeñan un papel importante en el desarrollo de sistemas de monitoreo y automatización, ya que permiten obtener información de diferentes variables físicas presentes en un proceso. Entre las magnitudes que pueden ser medidas se encuentran la temperatura, presión, desplazamiento, radiación, intensidad luminosa, humedad, concentración y flujo, entre otras. La información obtenida puede utilizarse para supervisar procesos, realizar mediciones en tiempo real o implementar sistemas de control automático.

Para una misma variable física existen diferentes tecnologías de sensores, cada una con características particulares de sensibilidad, precisión, rango de medición y condiciones de operación. La selección del sensor depende de la naturaleza de la magnitud que se desea medir, así como de los requerimientos específicos de la aplicación. Debido a la gran diversidad de dispositivos desarrollados para diferentes aplicaciones, los sensores pueden clasificarse de acuerdo con distintos criterios, como el principio físico de operación, la variable medida o la tecnología empleada para la detección [16].

1.2.1 Características generales de los sensores

El desempeño de un sensor está determinado por un conjunto de características que describen la forma en que responde ante la magnitud física que se desea medir. Estos parámetros permiten evaluar la calidad de la medición y constituyen un criterio importante para seleccionar el sensor más adecuado de acuerdo con las necesidades de una aplicación. En la siguiente sección se describen estas características utilizando los nombres más comúnmente aceptados [17].

Rango de medición

El rango de medición corresponde al intervalo de valores dentro del cual un sensor puede operar correctamente. Este intervalo está definido por un límite inferior y un límite superior, fuera de los cuales el sensor puede presentar errores importantes o incluso sufrir daños permanentes. La correcta selección del rango garantiza que el dispositivo opere dentro de sus especificaciones y proporcione mediciones confiables [16].

Sensibilidad

La sensibilidad representa la capacidad del sensor para responder ante pequeñas variaciones de la magnitud medida. Matemáticamente corresponde a la relación entre el cambio producido en la señal de salida y la variación de la magnitud de entrada. Un sensor con mayor sensibilidad permite detectar cambios más pequeños de la variable física, incrementando la capacidad de resolución del sistema de medición [18].

Resolución

La resolución es la mínima variación de la magnitud de entrada que puede producir un cambio detectable en la señal de salida del sensor. Una alta resolución permite distinguir cambios muy pequeños de la variable medida y constituye una característica importante en aplicaciones donde se requieren mediciones de alta precisión. En las especificaciones técnicas de los sensores suele expresarse junto con el rango de medición y la incertidumbre del sistema [16-18].

Exactitud y precisión

La exactitud expresa el grado de cercanía entre el valor medido y el valor real de la magnitud física. Por otra parte, la precisión se refiere a la capacidad del sensor para obtener resultados consistentes cuando una misma medición se repite bajo las mismas condiciones [1]. Aunque ambos conceptos suelen emplearse como sinónimos, representan propiedades diferentes del sistema de medición. Un sensor puede ser preciso al generar resultados muy similares entre sí y, sin embargo, presentar una baja exactitud debido a la existencia de errores sistemáticos [16].

Linealidad

La linealidad describe el grado de proporcionalidad entre la magnitud de entrada y la señal de salida del sensor. En un comportamiento ideal, ambas variables mantienen una relación lineal en todo el rango de operación; sin embargo, en la práctica suelen existir pequeñas desviaciones que originan errores de no linealidad. Una buena linealidad simplifica la calibración del sensor y facilita el procesamiento de las mediciones obtenidas [16].

Repetibilidad

La repetibilidad corresponde a la capacidad del sensor para producir la misma señal de salida cuando una misma magnitud es aplicada repetidamente bajo condiciones idénticas de operación. Esta característica constituye un indicador de la estabilidad del proceso de medición y refleja la influencia de factores aleatorios, como el ruido o pequeñas variaciones ambientales.

Histéresis

La histéresis representa la diferencia entre la respuesta del sensor cuando la magnitud medida aumenta y cuando disminuye, aun cuando ambos procesos pasen por el mismo valor de entrada. Este fenómeno provoca que la salida dependa del historial de la medición y puede introducir errores adicionales cuando las variables cambian de forma cíclica.

Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta es el intervalo necesario para que la señal de salida alcance un valor estable después de que ocurre un cambio en la magnitud medida. Este parámetro resulta especialmente importante en aplicaciones donde las variables presentan cambios rápidos, ya que determina la capacidad del sensor para seguir dichas variaciones sin introducir retrasos significativos [16].

1.2.2 Tipos de sensores

Debido a la gran diversidad de variables físicas que pueden medirse, se han desarrollado diferentes tecnologías de sensores para satisfacer los requerimientos de aplicaciones específicas. Para una misma magnitud física puede existir más de un tipo de sensor, por lo que la selección depende de factores como la sensibilidad, precisión, rango de medición, tiempo de respuesta y condiciones de operación [19]. Entre las principales tecnologías de sensado se encuentran los sensores eléctricos, mecánicos, semiconductores, electroquímicos y ópticos. Cada uno de ellos emplea un principio de funcionamiento diferente para transformar la magnitud de interés en una señal susceptible de ser medida y procesada [16].

Sensores eléctricos

Los sensores eléctricos convierten una magnitud física en una señal eléctrica mediante la variación de parámetros como el voltaje, la corriente, la resistencia o la capacitancia. Su funcionamiento se basa en que la magnitud que se desea medir modifica alguna propiedad eléctrica del elemento sensor, generando una señal proporcional a dicha variación [19]. Debido a su simplicidad de implementación y facilidad de integración con sistemas electrónicos, son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales y de instrumentación.

Sensores mecánicos

Los sensores mecánicos detectan cambios físicos como fuerza, presión, deformación, desplazamiento, aceleración o vibración mediante elementos mecánicos que responden a la perturbación aplicada. El desplazamiento producido es posteriormente convertido en una señal medible por medio de un transductor. Este tipo de sensores se emplea con frecuencia en sistemas de monitoreo estructural, control de movimiento y medición de variables mecánicas [16].

Sensores semiconductores

Los sensores semiconductores utilizan materiales como el silicio para detectar cambios en diferentes variables físicas o químicas mediante la modificación de sus propiedades eléctricas. Su principio de operación se basa principalmente en la respuesta de uniones tipo *p*-*n*, el efecto Hall o la variación de la conductividad eléctrica ocasionada por la presencia de determinadas sustancias o cambios de temperatura. Estos sensores destacan por su reducido tamaño, bajo costo y facilidad de integración en circuitos electrónicos, aunque su desempeño puede verse afectado por las condiciones ambientales y la presencia de interferencias químicas [16].

Sensores electroquímicos

Los sensores electroquímicos están constituidos generalmente por un electrodo de trabajo, un electrodo de referencia y, en algunos casos, un contraelectrodo. Su funcionamiento consiste en medir parámetros eléctricos generados por reacciones electroquímicas, como diferencias de potencial, corriente o carga eléctrica, los cuales se relacionan con la concentración de la sustancia de interés. Estos sensores presentan alta sensibilidad y buena precisión, por lo que son ampliamente utilizados para la medición de pH, concentración de iones, oxígeno disuelto y detección de gases [16].

Sensores ópticos

Los sensores ópticos utilizan la interacción de la radiación óptica con un medio para detectar cambios en una magnitud física. La información obtenida se encuentra asociada a variaciones en parámetros de la luz como la intensidad, longitud de onda, fase o polarización [2]. Entre sus principales ventajas destacan su alta sensibilidad, inmunidad a la interferencia electromagnética y la posibilidad de realizar mediciones remotas [20]. Debido a estas características, los sensores ópticos han adquirido un gran interés en aplicaciones científicas e industriales y constituyen la base del presente trabajo, por lo que serán descritos con mayor detalle en la siguiente sección.

1.3 SENSORES ÓPTICOS

Los sensores ópticos constituyen una de las tecnologías de sensado con mayor desarrollo en las últimas décadas debido a las ventajas que ofrecen frente a los sensores convencionales.

A diferencia de otras tecnologías de sensado, los sensores ópticos emplean la luz como medio de transmisión de la información. La radiación óptica puede propagarse a través del espacio libre o mediante una guía de onda, como una fibra óptica, hasta interactuar con el elemento sensor. [19] Durante esta interacción, las propiedades de la luz experimentan modificaciones que posteriormente son detectadas por un sistema fotodetector y procesadas para obtener información sobre la magnitud medida.

El principio de medición de un sensor óptico consiste en convertir una variación física en una modificación de una o varias propiedades de la luz. [1] Entre las propiedades que pueden alterarse se encuentran la intensidad, la longitud de onda, la fase, la polarización y el tiempo de propagación. La selección de la propiedad óptica depende del fenómeno físico involucrado y de la sensibilidad requerida para la aplicación específica. [18]

Las ventajas de los sensores ópticos han favorecido su incorporación en una gran variedad de aplicaciones científicas e industriales. Entre sus principales características destacan la alta sensibilidad, el reducido tamaño, la posibilidad de realizar mediciones remotas, la inmunidad a la interferencia electromagnética, el aislamiento eléctrico, la resistencia a ambientes

corrosivos y la capacidad para operar en condiciones donde los sensores electrónicos convencionales presentan limitaciones [2], [20].

Gracias a estas propiedades, los sensores ópticos se utilizan en áreas como la automatización industrial, la aeronáutica, la industria petroquímica, el monitoreo estructural, la medicina, las telecomunicaciones y la investigación científica. En el ámbito biomédico permiten medir parámetros fisiológicos como temperatura, presión, flujo sanguíneo y concentración de determinadas sustancias. En aplicaciones industriales son empleados para supervisar procesos de manufactura, detectar deformaciones mecánicas, monitorear vibraciones y controlar variables de operación en ambientes de difícil acceso [16].

El desarrollo de nuevas fuentes ópticas, detectores y sistemas de adquisición de datos ha impulsado el crecimiento de esta tecnología durante las últimas décadas. La incorporación de dispositivos optoelectrónicos de alta sensibilidad, así como el empleo de técnicas avanzadas de procesamiento de señales, ha permitido mejorar la resolución y la confiabilidad de los sistemas de medición basados en sensores ópticos, ampliando significativamente su campo de aplicación [20].

Dentro de esta amplia familia de dispositivos, los sensores de fibra óptica representan una de las tecnologías de mayor interés debido a que la propia fibra puede emplearse simultáneamente como medio de transmisión y como elemento sensor. Esta característica permite desarrollar sistemas de medición compactos, inmunes a interferencias electromagnéticas y con capacidad para realizar monitoreo distribuido o remoto. Debido a la importancia de esta tecnología y a su relación directa con el sistema desarrollado en el presente trabajo, en el siguiente apartado se describen los fundamentos de los sensores de fibra óptica. [1-2].

1.3.1 Sensores de Fibra óptica

Los sensores de fibra óptica (SFO) son dispositivos dieléctricos que operan a frecuencias ópticas, son inmunes a la interferencia electromagnética y tienen la capacidad de llevar a cabo mediciones remotas. Los componentes básicos de un sensor de fibra óptica son una fuente óptica, un transductor y un receptor. En estos dispositivos de detección, se utilizan con frecuencia láseres, diodos y/o LED como fuente óptica. Como transductor (el corazón del sensor) se emplean fibras ópticas (monomodo o multimodo), fibras dopadas y/o materiales a granel. A la salida del sistema sensor, se utiliza un fotodetector para detectar la variación en la señal óptica causada por la perturbación física del sistema [2]. Como se observa en el esquema de la **Figura 1.1**.

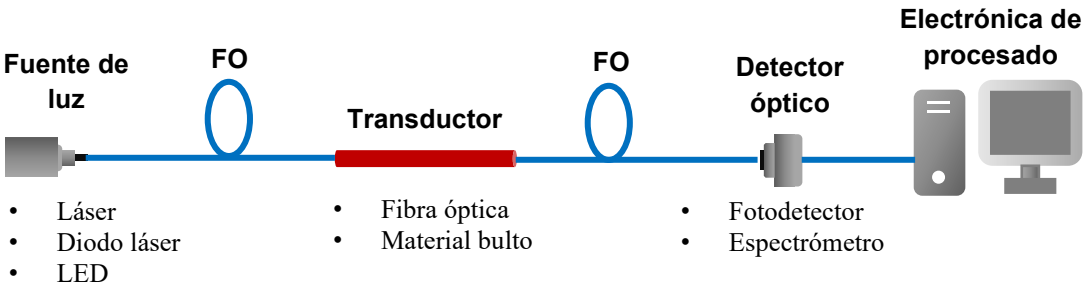


Figura 1.1 Diagrama estructura básica de los sensores de fibra óptica.

El uso de la tecnología de fibra óptica en los sistemas de detección presenta ventajas técnicas y económicas en comparación con los sensores convencionales no ópticos. Dado que la fibra óptica es un medio dieléctrico, los sensores de fibra óptica (OFS, por sus siglas en inglés) son totalmente inmunes a cualquier tipo de interferencia electromagnética, pueden soportar temperaturas relativamente altas gracias al alto punto de fusión de la fibra óptica, dadas las dimensiones y naturaleza de las fibras ópticas, se pueden fabricar transductores ópticos pequeños y ligeros [1].

1.3.2 Clasificación de los SFO

Los sensores de fibra óptica pueden clasificarse de acuerdo con diferentes criterios, dependiendo de la función que desempeña la fibra dentro del sistema de medición, del principio físico de detección o de la propiedad óptica que experimenta la modulación durante el proceso de sensado. Entre las distintas clasificaciones propuestas en la literatura, la más utilizada considera la participación de la fibra óptica en el proceso de medición, distinguiendo entre sensores intrínsecos y extrínsecos. De manera complementaria, los sensores también pueden clasificarse según el parámetro óptico modulado, como intensidad, fase, longitud de onda o estado de polarización. [1-2].

Sensores de fibra óptica intrínsecos

En los sensores intrínsecos, la fibra óptica constituye simultáneamente el medio de transmisión y el elemento sensor. La magnitud física de interés actúa directamente sobre la fibra, modificando alguna de las propiedades de la luz que se propaga en su interior (**Ver Figura 1.2a**). Como consecuencia de esta interacción, la información asociada a la variable medida permanece confinada dentro de la fibra hasta llegar al sistema de detección, sin necesidad de abandonar el medio de propagación [2].

Una de las principales ventajas de los sensores intrínsecos es que toda la información permanece confinada dentro de la fibra óptica, lo que proporciona un elevado aislamiento eléctrico, inmunidad a interferencias electromagnéticas y la posibilidad de realizar mediciones remotas o distribuidas a grandes distancias. Estas características han favorecido su utilización en aplicaciones de monitoreo estructural, instrumentación industrial, sistemas aeroespaciales, procesos químicos y monitoreo biomédico. [1-2].

Sensores de fibra óptica extrínsecos

En los sensores extrínsecos, la fibra óptica únicamente transporta la luz entre la fuente óptica, el elemento sensor y el sistema de detección. En este caso, la interacción con la variable física ocurre fuera de la fibra, en un componente óptico externo diseñado específicamente para responder a la magnitud que se desea medir. La fibra funciona como un enlace óptico de baja pérdida, permitiendo transmitir la información desde el punto de medición hasta el sistema de adquisición [19].

Generalmente, estos sensores utilizan una fibra para conducir la radiación óptica hacia el cabezal sensor y otra para transportar la señal modulada hacia el fotodetector, aunque existen configuraciones en las que ambas funciones pueden realizarse mediante una sola fibra empleando elementos reflectivos o divisores ópticos (**Ver Figura 1.2b**). La flexibilidad de esta configuración facilita la incorporación de diferentes transductores ópticos sin modificar el sistema de transmisión [4].

Los sensores extrínsecos conservan las ventajas propias de las fibras ópticas, como la inmunidad a interferencias electromagnéticas, el aislamiento eléctrico y la posibilidad de realizar mediciones a distancia. Debido a ello, son ampliamente utilizados para la medición de desplazamiento, presión, nivel, temperatura, vibraciones y variables químicas en ambientes donde los sensores electrónicos convencionales presentan limitaciones [1-2].

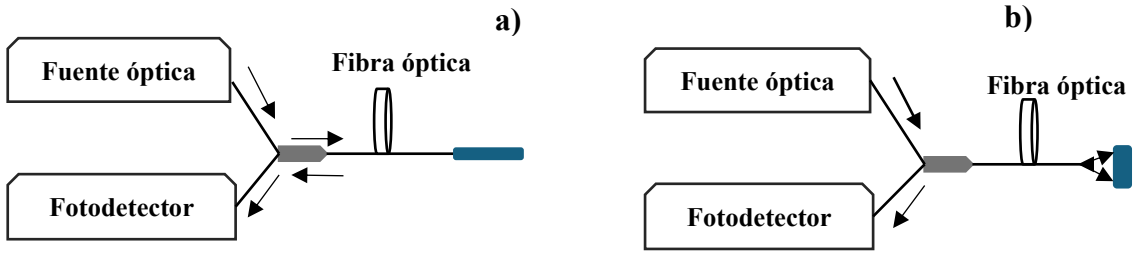


Figura 1.2 Diagrama configuraciones de un sensor de fibra óptica: a) sensor intrínseco y b) sensor extrínseco.

Los sensores de fibra óptica ya sean intrínsecos o extrínsecos, funcionan mediante la modulación de una (o más) de las siguientes características de la luz guiada: la intensidad, la longitud de onda o frecuencia, el estado de polarización y la fase.

Clasificación de acuerdo con el parámetro óptico modulado

Además de la clasificación funcional, los sensores de fibra óptica pueden agruparse considerando la propiedad de la luz que resulta modificada durante el proceso de sensado. Esta clasificación está directamente relacionada con el mecanismo físico mediante el cual la perturbación interactúa con la radiación óptica y constituye uno de los criterios más utilizados para describir el funcionamiento de los sensores de fibra óptica [1].

Sensores de intensidad

Los sensores de intensidad operan mediante la variación de la potencia óptica detectada como consecuencia de la interacción entre la luz y la magnitud física de interés. La modulación de intensidad puede originarse por fenómenos de absorción, reflexión, dispersión, acoplamiento óptico, microcurvaturas o pérdidas de propagación inducidas en la fibra [1]. Debido a la simplicidad de su principio de funcionamiento, estos sensores presentan una implementación relativamente sencilla y un costo reducido, por lo que continúan siendo ampliamente utilizados en aplicaciones industriales y de laboratorio [4].

En este tipo de sensores, la información se obtiene comparando la intensidad óptica recibida por el fotodetector con una condición de referencia. Aunque son más sensibles a variaciones de la fuente óptica y a pérdidas de transmisión, representan una alternativa adecuada cuando se requieren sistemas compactos y de fácil instrumentación [1].

Sensores interferométricos o de fase

Los sensores interferométricos utilizan la variación de la fase de la luz para determinar la magnitud física aplicada [1]. Su funcionamiento se basa en la interferencia entre una señal de referencia y una señal de medición, de manera que pequeñas perturbaciones producen cambios apreciables en el patrón de interferencia. Entre las configuraciones más utilizadas se encuentran los interferómetros de Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac y Fabry-Pérot [4].

Gracias a la elevada sensibilidad de la medición interferométrica, estos sensores permiten detectar deformaciones, vibraciones y desplazamientos extremadamente pequeños. Sin embargo, requieren fuentes ópticas coherentes y sistemas de interrogación más complejos que los sensores de intensidad.

Sensores basados en longitud de onda

En este grupo, la magnitud física provoca un desplazamiento de la longitud de onda de la señal óptica. La información se obtiene mediante el análisis espectral de la radiación propagada, siendo las redes de Bragg en fibra (FBG) y las redes de período largo (LPFG) algunos de los dispositivos más representativos. Este tipo de sensores presenta una elevada estabilidad frente a fluctuaciones de potencia y permite realizar mediciones multiplexadas utilizando una misma fibra óptica [2].

Sensores de polarización

Los sensores de polarización aprovechan las variaciones del estado de polarización de la luz ocasionadas por cambios en la birrefringencia de la fibra. Factores como esfuerzos mecánicos, presión, temperatura o campos magnéticos modifican las condiciones de propagación de los modos de polarización, produciendo cambios que pueden relacionarse con la magnitud física aplicada [1]. Aunque su implementación requiere un cuidadoso control del estado de polarización, estos sensores ofrecen alta sensibilidad para aplicaciones específicas de instrumentación y monitoreo [4].

1.4 FIBRA ÓPTICA ADELGAZADA (FOA)

Las fibras ópticas adelgazadas fundidas bicónicas (Biconical Fused Optical Fiber Tapers) o simplemente *TFO*, son fibras ópticas a las cuales se les ha reducido el diámetro a lo largo de una sección. La palabra en inglés "*taper"* se refiere en general a cualquier estructura con una geometría cónica. El propósito de adelgazar la fibra es de alterar de forma pasiva la luz que se propaga dentro de ella, por ejemplo, modificando la Apertura Numérica o alterar la densidad de potencia óptica en la superficie circundante a la cintura del *TFO* [21].

1.4.1 Estructura de una FOA

La estructura básica de una fibra óptica adelgazada consiste principalmente en las siguientes regiones presentadas en la **Figura 1.3**. Durante el proceso de adelgazamiento hay dos regiones de la fibra óptica que no sufren modificación alguna, con un radio constante $\boldsymbol{r_0}$. Las regiones llamadas *transición* de longitud $\boldsymbol{z_0}$**,** corresponden a zonas de transición en las que el radio de la fibra decrece, por último, la región *cintura* es la zona más estrecha de la fibra de longitud $\boldsymbol{l_w}$ que además presenta un radio constante de cintura $\boldsymbol{r_w}$.

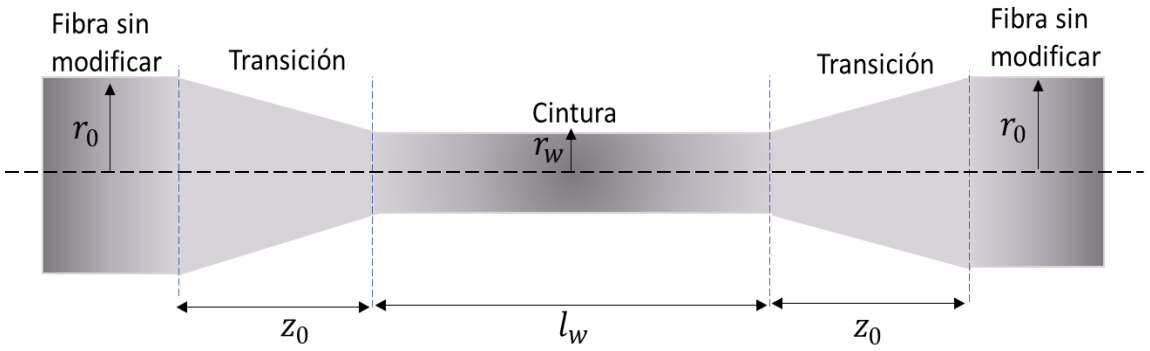


Figura 1.3 Regiones de la estructura básica de una fibra óptica adelgazada.

Un *taper de fibra óptica* es aproximadamente adiabático si el ángulo cónico (ángulo de transición Ω (z) ver **Figura 1.4** es lo suficientemente pequeño en cualquier lugar para garantizar que haya una pérdida insignificante de potencia del modo fundamental a medida que se propaga a lo largo de la longitud del *TFO* [7]. El criterio de adiabaticidad más simple es el criterio de longitud - escala. Se basa en el argumento físico de que la longitud – escala cónica local debe ser mucho mayor que la longitud de acoplamiento entre el modo fundamental y el modo de acoplamiento dominante para que la pérdida de potencia sea pequeña. [8].

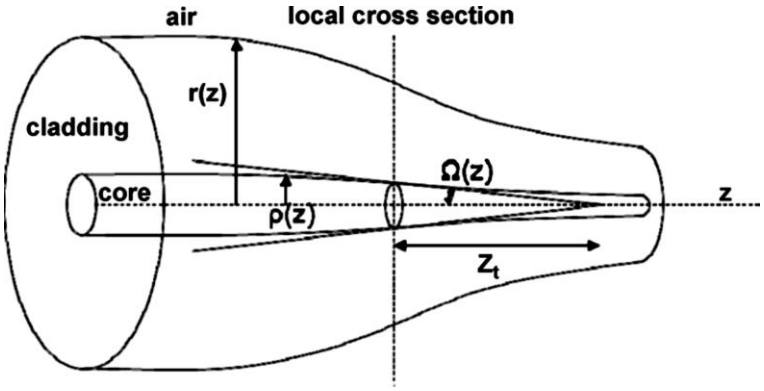


Figura 1.4 Diagrama de la zona de transición en un taper [22].

1.4.2 Técnicas de Fabricación de las FOA

Las fibras ópticas adelgazadas pueden obtenerse mediante diferentes técnicas de fabricación, las cuales tienen como objetivo reducir de manera controlada el diámetro de una sección de la fibra para modificar sus propiedades de propagación óptica. La técnica seleccionada influye directamente en la geometría de la microestructura, la longitud de las zonas de transición, el diámetro de la cintura y, por consiguiente, en la sensibilidad del sensor. Estas técnicas pueden clasificarse en dos grupos: 1) adelgazamiento por calentamiento – estirado y 2) adelgazamiento por desbaste, de estos se desglosan diferentes técnicas las cuales se presentan a continuación:

1. Adelgazamiento por calentamiento – estirado.

1.1 Arco eléctrico

La fibra óptica es calentada al hacerla pasar por un arco eléctrico generado por un par de electrodos, al mismo tiempo se debe generar tensión en los extremos de la fibra para su estrechamiento.

Una descarga de arco es un fenómeno complejo durante el cual ocurren diferentes procesos, como la emisión de electrones por un electrodo, donde se produce una alta intensidad de campo eléctrico generado por las puntas de los electrodos, y mientras la fibra transita entre los electrodos se ionizan átomos de nitrógeno y oxígeno, a través de impactos, creando un plasma de alta temperatura que comprende electrones e iones [22].

1.2 Filamento de fusión

El filamento de fusión se basa en un elemento que se calienta por una resistencia eléctrica, dadas las temperaturas requeridas, son muy pocos los metales que pueden cumplir con esta condición. Al igual que el método de fusión por arco eléctrico, la fibra se calienta predominantemente por convección térmica a través del ambiente circundante, se utiliza típicamente una cinta de tungsteno en la forma de omega invertida como se muestra en la **Figura 1.5**, mientras que el tungsteno tiene un punto de fusión muy alto, este se oxida rápidamente, por lo tanto, un gas de purga inerte debe rodear el filamento [23].

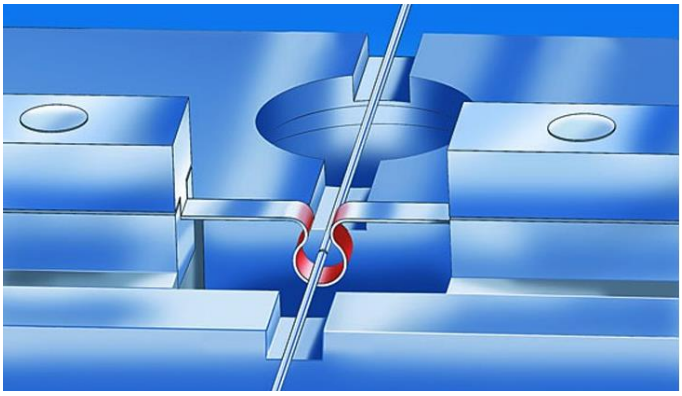


Figura 1.5 Diagrama de un filamento en forma de omega invertida [23].

1.3 Laser de CO_2

El principio de estrechamiento en esta técnica consiste en utilizar un láser como fuente térmica para calentar la fibra, y al generar tensión en sus extremos con motores a pasos, lograr el estrechamiento de ésta. Comúnmente se utiliza un láser de CO_2 debido a la alta potencia que alcanza. Al utilizar un láser, se tiene la ventaja de utilizar una fuente de calor puntual, y de esta forma poder controlar con precisión la longitud de las fibras estrechadas [24].

Debido a que las fibras a base de sílice son de altísima pureza y transparencia en el visible y el infrarrojo cercano, es posible calentarlas con un láser de CO_2, que tiene una longitud de onda de alrededor de los 10 micrómetros, la cual es bien absorbida por el material [25].

1.4 Mechero oscilante

En esta técnica se utiliza un mechero que genera una flama por combustión de gases como el hidrógeno, propano o butano como combustible y oxígeno como carburante, que solo calienta una pequeña sección de la fibra por un tiempo específico.

El calentamiento de la fibra debe ser de manera oscilatoria a una velocidad constante a lo largo de la sección, de esta forma, en cada ciclo de oscilación cada elemento en dicha longitud de la fibra se caliente idénticamente. Mientras el calentador actúa, se produce una tensión en cada extremo de la fibra por la acción de los motores [22].

2. Adelgazamiento por desbaste.

2.1 Pulido Mecánico

El proceso de fabricación de fibras ópticas con pulido lateral (side-polished) requiere sistemas integrados de micro-mecanizado que permiten una manipulación precisa de la fibra. El control de la profundidad y calidad se logra mediante monitoreo en tiempo real, ajustes de contacto preciso y mediciones de pérdida óptica.

Los componentes esenciales incluyen:

Plataforma de soporte: Estructura principal que sostiene el sistema, incluyendo un módulo de elevación que conecta con el cabezal de pulido

Módulo de pulido y esmerilado: Utiliza ruedas específicas (polishing and grinding wheels) diseñadas para remover el material del revestimiento (cladding) de forma controlada [26].

Sistema de sujeción (Clamping): Utiliza bloques de soporte o ranuras con bloques deslizantes (flange sliding blocks) para fijar los extremos de la fibra, evitando el movimiento relativo no deseado entre la fibra y la rueda abrasiva durante el proceso

Módulos auxiliares: Se integran sistemas de transmisión de fibra, módulos de calefacción (si se requiere tapering térmico combinado) y sistemas de monitoreo en tiempo real [27].

2.2 Ataque químico

El ataque químico es una técnica principalmente para fabricar sondas de fibra óptica con puntas de fibra óptica adelgazada, se trata de una técnica en la que consiste básicamente en insertar un extremo de la fibra, la longitud deseada, en un compuesto química por un determinado tiempo para que este modifique la estructura de la fibra [28].

La estructura y la interfaz núcleo/revestimiento se conserva en los métodos por calentamiento y estirado, mientras que en los *TFO* fabricados por ataque químico tienden a dejar solo el núcleo en la región de la cintura, en particular el índice de refracción disminuye a medida que el núcleo se elimina a través de esta técnica [29].

1.4.3 Técnica de fusión por calentamiento estirado

El vidrio basado en sílice no tiene una temperatura exacta de fusión como otros materiales, sin embargo, su viscosidad se reduce considerablemente al grado de poder ser manipulable alrededor de los 1200ºC; para aplicaciones donde se necesita que varias fibras se fusionen entre sí, esta temperatura debe llegar a más de 2100°C [30], con el propósito de que la viscosidad de la fibra se reduzca lo suficiente como para permitir que la tensión superficial del vidrio disminuya; con esto se logra que el vidrio fluya y se mezclen sus componentes.

La cantidad de fuentes de calor que alcanzan esta temperatura son limitadas. Por otro lado, la zona en que se aplica el calor debe ser altamente controlada, no solo en el control de la temperatura y su estabilidad, sino también en su área geométrica, la ubicación de la fibra a la fuente de calor y un ambiente con una atmósfera libre de polvo [8].

En la técnica de fusión por calentamiento estirado, el mechero debe estar en oscilación al mismo tiempo que la fibra se estira longitudinalmente hasta dejarla con el diámetro deseado, como se muestra en la **Figura 1.6.**

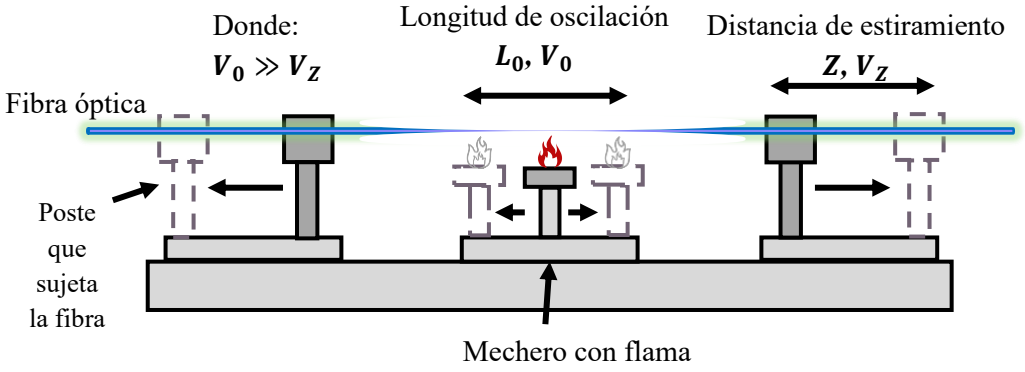


Figura 1.6 Diagrama esquemático del sistema de fusión por calentamiento estirado.

El tiempo de calentamiento y el radio final de la fibra son determinados por los parámetros que se le introducen al sistema, los cuales son: *velocidad de oscilación del mechero* V_0, *velocidad de estiramiento de la fibra* V, *longitud de estiramiento de la fibra* Z y la *longitud de oscilación del mechero* L_0.

En un modelo simple para la forma de una fibra adelgazada, se supone que una longitud fija $\boldsymbol{L_0}$ se calienta y estira uniformemente, mientras que fuera de esta zona la fibra es fría y sólida. Se predice que el diámetro $\boldsymbol{\rho}$ del *TFO* variará con la extensión del valor de $\boldsymbol{Z}$ como sigue:

$$\rho = \rho_0 \, exp^{\left[\frac{-Z}{2 \cdot L_0}\right]} \quad [nm] \qquad (1)$$

Donde, $\boldsymbol{L_0}$ es la longitud de oscilación del mechero, $\boldsymbol{Z}$ la longitud de estiramiento, $\boldsymbol{\rho_0}$ el diámetro inicial de la fibra y $\boldsymbol{\rho}$ el diámetro final de la fibra que se obtendrá [11].

1.4.4 Principio de operación de las FOA

La transmisión de la luz en una fibra óptica adelgazada se presenta en el esquema de la **Figura 1.7**, en estas microestructuras, parte de la energía es guiada a través de la fibra en forma de ondas evanescentes. Cuando se producen cambios de índice de refracción en el entorno externo al *TFO*, estas ondas experimentan un cambio espectral y de intensidad proporcional a la perturbación externa; lo cual hace estas microestructuras ideales para el desarrollo de sensores altamente sensibles [22].

El área cónica de la fibra óptica facilita la espectroscopia de onda evanescente, en la que se mide el espectro de absorción del medio circundante. Alternativamente, la influencia del medio circundante sobre las propiedades de los modos ópticos de la guía de ondas cónica se puede explicar como un cambio en el índice de refracción, es decir, funcionará como un refractómetro [31].

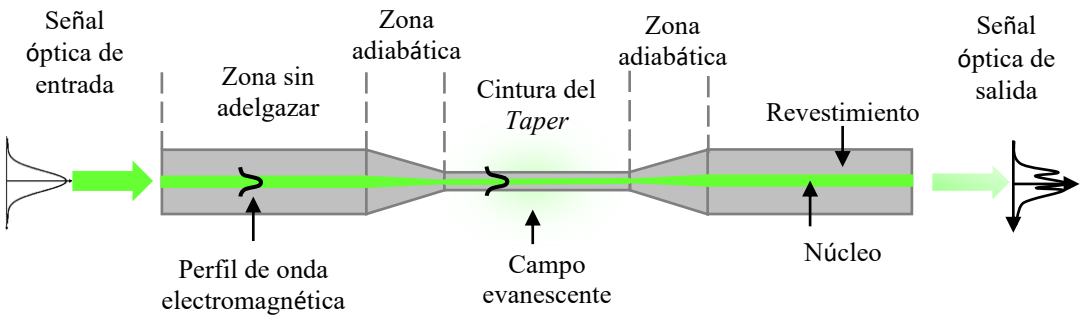


Figura 1.7 Principio de operación de las fibras ópticas adelgazadas.

Diversas configuraciones de sensores basados en fibras ópticas adelgazadas han sido reportadas a la fecha en la literatura para aplicaciones de sensado óptico de diferentes parámetros físicos, como: índice de refracción, concentración, curvatura, temperatura, etc. En la siguiente **Tabla 1.1** se presentan algunas de las aplicaciones de estas microestructuras tomando en consideración la técnica de fabricación y la perturbación física medida.

Técnica de fabricación	**Parámetro de sensado**	**Referencia**
Calentamiento – estirado	Índice de refracción	[44]
CO_2	Curvatura	[45]
Arco eléctrico	Índice de refracción	[48]
Arco eléctrico	Temperatura	[46]
Ataque químico	Concentración	[47]

Tabla 1.1. Aplicaciones de fibras ópticas adelgazadas fabricadas mediante diferentes técnicas para la medición de diversas magnitudes.

Como se observa en la **Tabla 1.1**, las fibras ópticas adelgazadas pueden emplearse para detectar diferentes magnitudes físicas utilizando distintas técnicas de fabricación. Los métodos de calentamiento–estirado, arco eléctrico, láser de CO_2 y ataque químico permiten obtener microestructuras con geometrías adecuadas para diferentes aplicaciones de sensado. La selección de la técnica depende de las características geométricas requeridas y de la aplicación particular del sensor.

1.5 FOTODETECTOR

Un fotodetector es un dispositivo cuyas características eléctricas (corriente, voltaje, resistencia) varían cuando se expone a la luz. Al convertir la energía de los fotones absorbidos en una forma medible, se puede utilizar para determinar el flujo de fotones (potencia óptica) de un haz de luz. Se basan en el efecto fotoeléctrico, la absorción de fotones por un material hace que los electrones pasen a niveles de energía más altos lo que da a lugar portadores de carga móviles baja el efecto de un campo eléctrico, estos portadores se mueven y producen una corriente eléctrica medible [1]. La corriente eléctrica $\boldsymbol{i_0}$ es proporcional a la potencia óptica incidente $\boldsymbol{P_0}$:

$$i_0 = \frac{P_0}{hf}\eta q = \frac{q\eta}{hc}\lambda P_0 = \Re(\lambda) \times P_0 \qquad [A] \qquad (2)$$

Donde $\frac{P_0}{hf}$ es el número de fotones incidentes por segundo, $\frac{P_0}{hf}\eta$ es el número de fotones detectados por segundo, η es la eficiencia cuántica de conversión y el factor de proporcionalidad $\Re$ llamado *responsividad*. Con el fin de mejorar la eficiencia del fotodetector, la responsividad debe ser lo más alta posible y la eficiencia cuántica de la conversión η, que depende del material utilizado para fabricar el fotodetector, debe ser lo más alta posible [32].

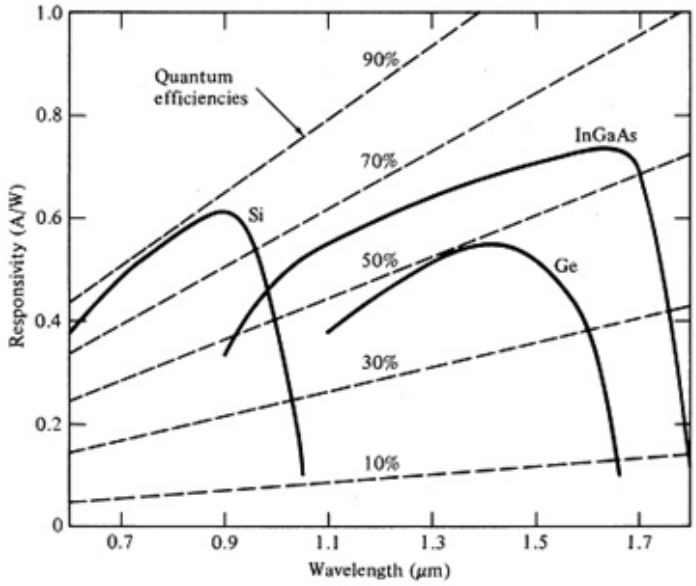


Figura 1.8. Comparación de la responsividad y la eficiencia cuántica en función de la longitud de onda para fotodiodos construidos con diferentes materiales [32].

1.6 FOTODIODO

Los fotodiodos de semiconductores son estructuras de unión p-n que se basan en el efecto fotoeléctrico. Los fotones absorbidos en la capa de agotamiento del dispositivo generan electrones y huecos que están sujetos al campo eléctrico local dentro de esa capa de los portadores de carga se desplazan en direcciones opuestas. Este proceso de transporte induce una corriente eléctrica en el circuito externo [32].

1.6.1 Principio de operación

El fotodiodo es un tipo de fotodetector que convierte la luz incidente en una señal eléctrica, ya sea en forma de corriente o voltaje. Generalmente, estos dispositivos cuentan con una ventana óptica o una conexión para fibra óptica que permite que la luz alcance una unión p-n o, más comúnmente, una unión PIN, la cual incorpora una región semiconductora intrínseca (Ver **Figura 1.9**) entre las regiones tipo p y tipo n. El uso de una unión PIN es frecuente

debido a que proporciona una mayor velocidad de respuesta en comparación con una unión p-n convencional.

Cuando un fotón con energía suficiente incide sobre la región de agotamiento (depletion region) del fotodiodo, puede transferir su energía a un átomo del material semiconductor y liberar un electrón, generando un par electrón-hueco. Bajo la acción del campo eléctrico presente en la unión, los electrones libres se desplazan hacia el cátodo, mientras que los huecos se mueven hacia el ánodo, produciendo una fotocorriente [33].

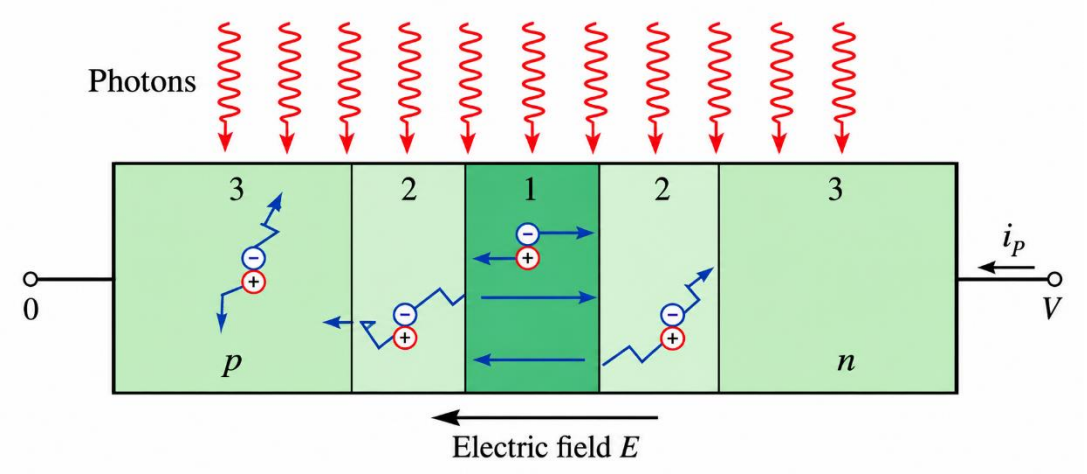


Figura 1.9. Diagrama estructura de un fotodiodo de unión PIN [32].

La fotocorriente generada está compuesta por la suma de la corriente oscura (dark current), presente aun en ausencia de iluminación, y la corriente producida por la incidencia de la luz. Por esta razón, es importante minimizar la corriente oscura para mejorar la sensibilidad del dispositivo.

1.6.2 Modos de operación

Un fotodiodo puede funcionar en uno de dos modos: *fotoconductor* (polarización inversa) o *fotovoltaico* (polarización cero). La selección del modo depende de los requisitos de velocidad de la aplicación y de la cantidad de corriente oscura tolerable (corriente de fuga).

Modo Fotoconductor

En el modo fotoconductor, se aplica una polarización inversa externa. La corriente medida a través del circuito indica la iluminación del dispositivo; la corriente de salida medida es linealmente proporcional a la potencia óptica de entrada. La aplicación de una polarización inversa aumenta el ancho de la unión de agotamiento, lo que produce una mayor capacidad de respuesta con una disminución de la capacitancia de la unión y produce una respuesta muy

lineal. El funcionamiento en estas condiciones tiende a producir una corriente oscura mayor, pero esto puede limitarse en función del material del fotodiodo [34].

Para tener una conexión de polarización inversa en los fotodiodos dependiendo de la disposición de sus terminales dentro del circuito, pueden distinguirse dos configuraciones de conexión, los fotodiodos tipo A y tipo B (Ver **Figura 1.10).** En la configuración Tipo A, el ánodo se conecta a un potencial positivo (una fuente de tensión) y el cátodo a tierra. Por otra parte, en la configuración Tipo B el ánodo se conecta a tierra y la señal se obtiene por el cátodo. Para mantener al fotodiodo en polarización inversa con esta configuración, el ánodo tendría que encontrarse a un potencial negativo respecto al cátodo

Estas configuraciones polarizan al fotodiodo en inverso, lo que significa que no conduce corriente en ausencia de luz, pero cuando la luz incide sobre él, genera una pequeña corriente inversa proporcional a la intensidad de la luz. En ambos casos, el principio de funcionamiento del fotodiodo permanece sin cambios; la diferencia radica en la referencia de potencial utilizada y en la dirección de la señal eléctrica obtenida.

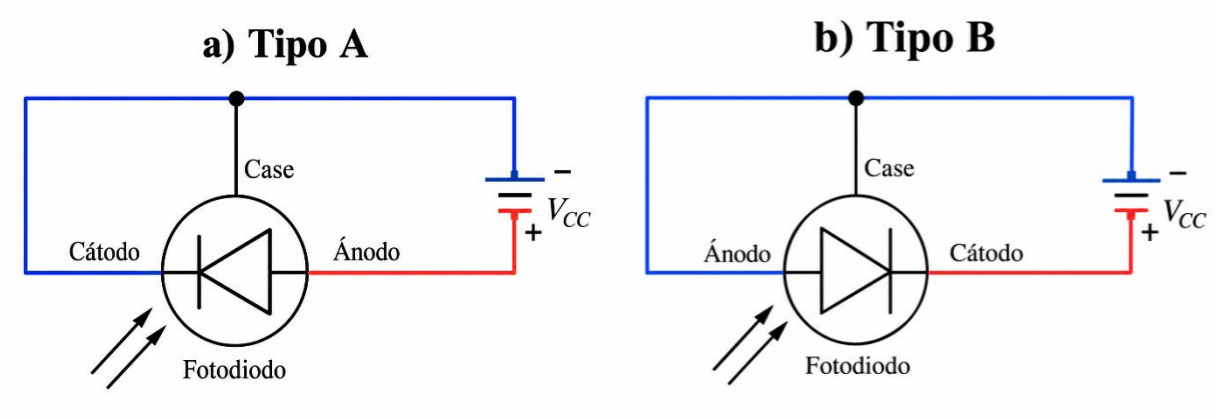


Figura 1.10. Configuraciones de polarización inversa de un fotodiodo: a) Tipo A, con el cátodo conectado a tierra, y b) Tipo B, con el ánodo conectado a tierra.

Un fotodiodo conectado al siguiente circuito mostrado en la **Figura 1.11** nos permitirá calcular potencias midiendo la caída de voltaje $\mathbf{V_L}$ en la resistencia de carga $\mathbf{R_L}$ relacionando la corriente generada del fotodiodo producto de la potencia óptica incidente $\mathbf{P_0}$, mientras que la resistencia $\mathbf{R_P}$ y el capacitor $\mathbf{C_P}$ nos brindan un circuito de protección **RC**, la función principal de este es limitar la cantidad de voltaje que llega al fotodiodo. Cuando ocurre una sobretensión, el capacitor se carga rápidamente a través del resistor, lo que ayuda a reducir la amplitud del pico de voltaje [34].

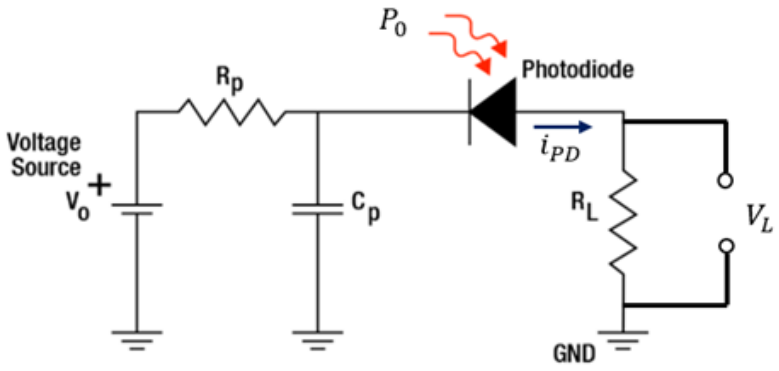


Figura 1.11 Circuito integrado al fotodiodo [34] .

Para obtener esta relación de la potencia óptica incidente $\mathbf{P_0}$ con el voltaje $\mathbf{V_L}$ medible en la resistencia de carga $\mathbf{R_L}$ es necesario partir de la ecuación 2 anteriormente descrita:

$$i_{PD} = \Re(\lambda) \times P_0 \quad [A] \qquad (2)$$

La relación de la resistencia de carga con la corriente y voltaje por ley de ohm

$$i_{PD} = \frac{V_L}{R_L} \quad [A] \qquad (3)$$

Despejando $\boldsymbol{P_0}$ en (2) obtenemos:

$$P_O = \frac{i_{PD}}{\Re(\lambda)} \quad [W] \qquad (4)$$

Sustituyendo $\boldsymbol{i_{PD}}$ en (4) por la relación en la ecuación (3) obtenemos:

$$P_0 = \frac{V_L}{\Re(\lambda) \times R_L} \quad [W] \qquad (5)$$

Para calcular el valor de $\mathbf{R_L}$ a utilizar en el CI conociendo $\boldsymbol{P_0}$obtendremos:

$$R_L = \frac{V_L}{\Re(\lambda) \times P_0} \quad [W] \qquad (6)$$

Modo Fotovoltaico

En este modo el fotodiodo opera sin una fuente de tensión externa aplicada. El dispositivo genera una tensión a través de sus terminales cuando la luz incide sobre él, aprovechando el efecto fotovoltaico natural de la unión p-n. La cantidad de corriente oscura se mantiene al mínimo durante el funcionamiento en modo fotovoltaico.

1.7 HERRAMIENTAS DE ADQUISIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS

1.7.1 Adquisición de datos

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso mediante el cual se transforman fenómenos físicos en datos aceptables por una computadora. El aspecto más importante en el proceso de adquisición de datos es la conversión de las señales analógicas recibidas de los instrumentos de medición a representaciones digitales que puedan ser procesadas por la computadora.

El propósito de un sistema DAQ es crear un entorno funcional y confiable que permita obtener resultados precisos, a menudo representados en tablas y gráficos, facilitando la investigación científica y las aplicaciones industriales [35].

Existen diversas plataformas utilizadas para desarrollar sistemas DAQ, cada una con características que facilitan la interacción con los instrumentos de medición:

El software constituye la base operativa de cualquier sistema DAQ, actuando como el puente entre el hardware de medición y el usuario final [36].

Su función principal es integrar diversas etapas del proceso de medición en una interfaz unificada:

Configuración del hardware: El software gestiona la interacción con tarjetas de adquisición, buses de comunicación (como Serial, GPIB o SCPI) y controladores (drivers), permitiendo que el equipo reconozca y se comunique con los instrumentos externos.

Visualización en tiempo real: Proporciona interfaces gráficas que permiten al usuario monitorear señales de forma continua, observando el comportamiento de las variables físicas mientras se capturan.

Almacenamiento: Facilita el registro sistemático de grandes volúmenes de datos, permitiendo su exportación a formatos comunes como Excel o su guardado directo en discos duros para su posterior revisión.

Análisis: Implementa algoritmos de procesamiento, filtrado de señales, cálculos matemáticos y técnicas de reducción de errores que transforman los datos crudos en información útil para la toma de decisiones o diagnósticos clínicos. [36]

1.7.2 Placa Arduino

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla. Se destaca por su facilidad de uso, costo accesible y gran cantidad de recursos disponibles [37].

Arduino es una plataforma de código abierto que combina dos elementos clave:

Hardware físico: Una placa de circuito programable (microcontrolador). Dispone de:

Pines de entrada/salida: Permiten conectar sensores (entrada) y actuadores como luces, motores o pantallas (salida).

Puerto USB: Se usa para alimentar la placa y para cargar el código desde el ordenador.

Regulador de voltaje: Permite alimentar la placa con baterías o fuentes externas.

Software (IDE): Un entorno de desarrollo que instalas en tu computadora para escribir y cargar instrucciones en el microcontrolador [37].

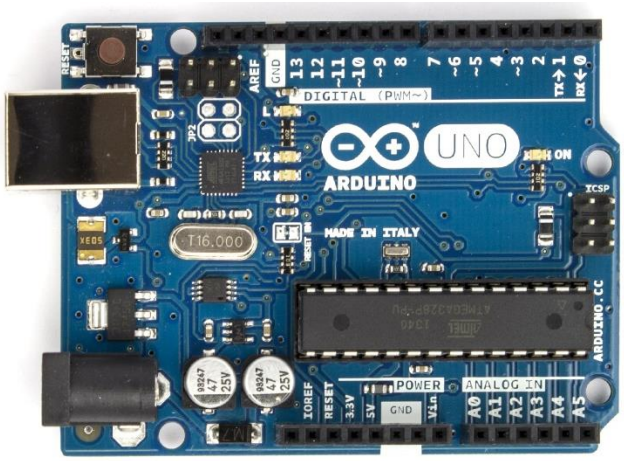


Figura 1.12. Placa Arduino modelo UNO [49].

Existen diversas variantes según la necesidad del proyecto:

Arduino UNO: El más estándar y recomendado para principiantes (**ver Figura 1.12).**

Arduino Nano: Una versión pequeña para proyectos compactos.

Arduino MEGA: Con más memoria y pines, ideal para proyectos complejos como impresoras 3D.

Arduino Leonardo: Capaz de emular un teclado o ratón USB.

1.7.3 Programación grafica con LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es una herramienta de programación gráfica que permite desarrollar sistemas de adquisición y análisis de datos con interfaces de usuario personalizados [38].

Se utiliza el bloque VISA Configure Serial Port para establecer la comunicación con Arduino. Se define la misma velocidad en baudios configurada en Arduino, junto con los parámetros estándar de comunicación: 8 bits de datos, sin paridad y 1 bit de parada (8N1). El bloque VISA Read se emplea para capturar los datos enviados desde Arduino.

Los datos digitales recibidos se escalan a valores de voltaje reales utilizando una constante de calibración que toma en cuenta la resolución del ADC.

La combinación de Arduino y LabVIEW permite un sistema de adquisición y visualización eficiente para las mediciones realizadas. Arduino actúa como el módulo de adquisición, mientras que LabVIEW se encarga del análisis y presentación de los datos.

Esta integración asegura una comunicación fluida y en tiempo real entre el hardware experimental y el software de visualización.

1.7.4 Ventajas de la integración Arduino-LabVIEW

La unión entre LabVIEW y Arduino permite una división del trabajo donde Arduino actúa como la interfaz de hardware para sensores y actuadores, mientras que LabVIEW implementa la lógica de control, el procesamiento de señales y el análisis avanzado. Esta combinación es altamente efectiva para la adquisición de datos, ya que Arduino garantiza una captura estable de las variables físicas, las cuales son transmitidas a una computadora para su tratamiento inmediato mientras que LabVIEW aporta capacidades de instrumentación virtual (VI) que permiten gestionar múltiples dispositivos simultáneamente y desplegar el comportamiento de diversas variables en una misma interfaz [13].

Ventajas económicas y operativas: Una de las principales ventajas de esta arquitectura es su viabilidad económica, ya que permite reemplazar equipos de adquisición de datos tradicionales por plataformas basadas en microcontroladores accesibles. Esta reducción de costos no compromete la funcionalidad, puesto que el sistema resultante mantiene un alto grado de confiabilidad, escalabilidad y flexibilidad, lo que lo hace ideal para una implementación industrial generalizada [39].

Interfaz gráfica y visualización: LabVIEW destaca por su capacidad para crear interfaces gráficas de usuario (HMI) intuitivas y altamente personalizables, que permiten la visualización en tiempo real de datos numéricos y representaciones gráficas, como las curvas características de voltaje-corriente (I-V). Estas interfaces permiten a los usuarios interactuar

con los procesos de forma sencilla, facilitando la supervisión de tendencias y la configuración de alarmas automáticas cuando los parámetros exceden los límites establecidos [40].

Aplicaciones educativas e industriales: En el ámbito educativo, esta combinación fomenta el aprendizaje mediante el diseño de circuitos, la programación de hardware y la comprensión de conceptos de instrumentación virtual en laboratorios remotos.

Los estudiantes pueden desarrollar competencias críticas al construir sistemas que superan las limitaciones de tiempo y ubicación de los laboratorios convencionales, alineándose con las metodologías de la industria [39].

En el sector industrial, la plataforma se aplica con éxito en diversas áreas, incluyendo:

Monitoreo ambiental: Seguimiento en tiempo real de contaminantes y parámetros ambientales [41].

Energías renovables: Gestión y control de la eficiencia en paneles solares fotovoltaicos [42].

Sistemas de control: Implementación de esquemas de control PID para plantas de temperatura [43].

CAPITULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 RESUMEN

En este capítulo se describe la metodología implementada para alcanzar los objetivos del proyecto. La primera etapa corresponde al desarrollo del sistema adquisidor de la señal óptica, donde se estableció la comunicación serial, el procesamiento de las señales adquiridas y la visualización en tiempo real de los datos ópticos convertidos en eléctricos.

La segunda etapa consistió en la fabricación y caracterización de fibras ópticas adelgazadas (FOA) mediante la técnica de fusión por calentamiento–estirado. Se definieron parámetros geométricos como la longitud de estiramiento, la velocidad de oscilación del mechero y el diámetro final de la cintura, evaluando posteriormente las microestructuras obtenidas mediante análisis geométrico y espectral.

Finalmente, en la tercera etapa se realizó la integración del sistema completo, incorporando las fibras ópticas adelgazadas al sistema detector óptico previamente desarrollado. Esta implementación permitió validar experimentalmente el desempeño del sensor, detectando las variaciones de potencia óptica en las fibras al ser sumergidas en soluciones acuosas de diferentes concentraciones.

2.2 SISTEMA DE DETECCION BASADO EN PROGRAMACIÓN LABVIEW Y UNA TARJETA ARDUINO

2.2.1 Diseño del circuito integrado al fotodiodo

El sistema de detección desarrollado se fundamenta en la conversión de la potencia óptica incidente sobre un fotodiodo en una señal eléctrica medible. Un fotodiodo conectado al circuito de la **Figura 2.1**, al ser expuesto a una potencia óptica este genera una corriente eléctrica que se convierte en una caída de voltaje V_La través de la resistencia de carga R_L.

El circuito integrado (CI) incorpora:

- Una fuente de alimentación.
- Circuito RC como protección al fotodiodo.
- El fotodiodo.
- Una resistencia de carga R_L.
- La referencia común conectada a tierra (GND).

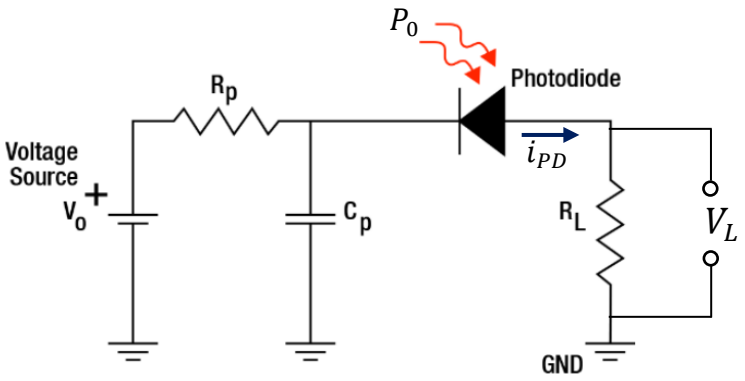


Figura 2.1. Circuito integrado al fotodiodo.

2.2.2 Adquisición de datos mediante Arduino

La tarjeta Arduino UNO fue empleada como sistema de adquisición de datos, permitiendo digitalizar la señal analógica proveniente del circuito integrado del fotodiodo.

La señal de voltaje V_L fue adquirida a través del pin analógico A0 y convertida mediante el convertidor analógico-digital (ADC) de 10 bits integrados en la tarjeta, cuya resolución depende del rango de voltaje, que, para este caso, va de 0 a 5V. La **Figura 2.2** ilustra la asignación de pines utilizada en la tarjeta Arduino.

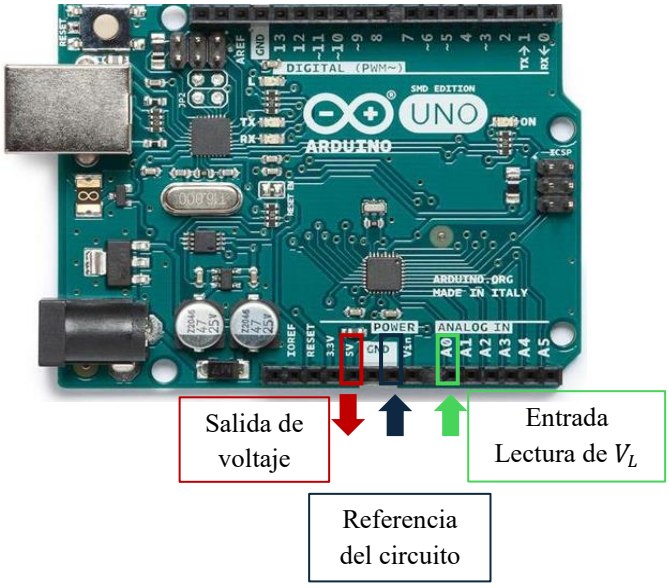


Figura 2.2. Entradas y Salidas a la placa Arduino.

El pin A0, encargado de la adquisición de señal, está conectado directamente a uno de los extremos de la resistencia de carga R_L. La referencia del circuito integrado al fotodiodo se conecta al pin GND de la tarjeta Arduino y la alimentación del circuito se realiza mediante la salida de 5 V que proporciona la propia placa, la **Figura 2.3** presenta el esquema eléctrico completo del sistema de detección.

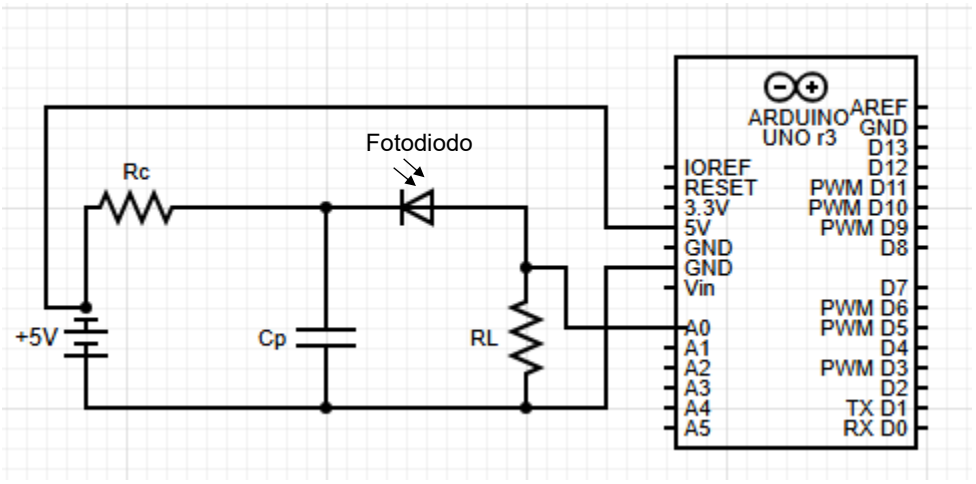


Figura 2.3. Conexiones entre la placa Arduino y el circuito integrado al Fotodiodo.

2.2.3 Diseño de la interfaz gráfica en LabVIEW

Se desarrolló una interfaz gráfica utilizando el entorno de programación LabVIEW con el objetivo de visualizar en tiempo real la señal generada por el fotodiodo y convertirla directamente en lecturas de potencia óptica, la **Figura 2.4** muestra el esquema de integración del circuito electrónico con la tarjeta Arduino y la interfaz desarrollada en LabVIEW, mostrando el flujo de la señal. Se utilizó el bloque *VISA Configure Serial Port* para establecer la comunicación con Arduino, y el bloque *VISA Read* para capturar los datos enviados desde la placa. Los datos digitales recibidos se escalaron a valores de voltaje reales utilizando una constante de calibración que toma en cuenta la resolución del ADC.

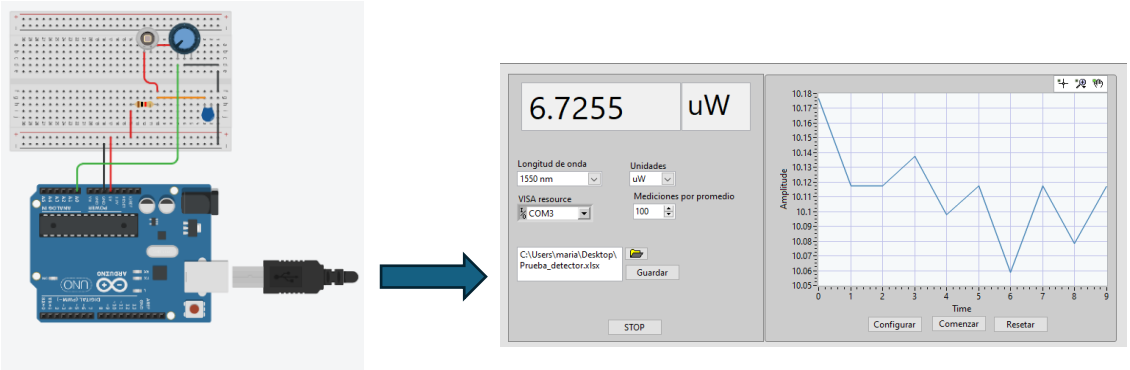


Figura 2.4. Implementación del sistema de adquisición Arduino–LabVIEW para la medición de potencia óptica.

La interfaz fue diseñada con el objetivo de facilitar la interpretación de los datos de voltaje y convertirlos directamente en lecturas de potencia óptica. La interfaz muestra el cálculo del promedio de las lecturas de voltaje dependiendo del valor introducido en el menú *mediciones por promedio*, a partir de este valor, determina la potencia óptica correspondiente utilizando la responsividad del fotodiodo y la resistencia de carga empleada, incluye un campo para que el usuario especifique la *longitud de onda* a la cual se realiza la medición y además pueda seleccionar la *unidad* de visualización deseada entre microwatts (µW), miliwatts (mW), watts (W), milivolts (mV) y volts (V), según sea necesario. La interfaz también presenta gráficamente las mediciones en función del tiempo para un número definido de muestras, lo que permite observar la evolución de la señal.

2.3 FOTODIODOS (PD) UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACION

Para el desarrollo de nuestro sistema de detección se utilizaron 3 modelos diferentes de fotodiodos: **a) SM05PD1A**, **b) LSIPD-L1-B-0** y **c) YA302PD**. El primero PD fue utilizado para el monitoreo de la potencia en la región del espectro visible (VIS) y los otros dos para el monitoreo en la región del espectro infrarrojo (NIR).

a) Fotodiodo SM05PD1A (VIS)

El fotodiodo SM05PD1A de la marca THORLABS fue utilizado para medir la potencia óptica de las fuentes de luz que emiten en el en el rango de longitud de onda de operación (Vis). El fotodiodo es un Tipo A (cátodo conectado a tierra). El ánodo del fotodiodo produce una corriente, que es función de la potencia de la luz incidente y la longitud de onda (λ). En la **Tabla 2.1** se muestran sus especificaciones:

Especificaciones Fotodiodo SM05PD1A		
Parámetro	**Símbolo**	**Valor**
Rango de Longitud de onda	λ	350 – 1100 nm
Longitud de onda pico	λ_p	980 nm
Responsividad	$\Re$ (λ)	0.65 A/W
Area activa (dimensión)		13 mm^2 (3.6 x 3.6 mm)
Tiempo de subida/bajada (632 nm, $\boldsymbol{R_L = 50\ \Omega}$, 20 V)	t_r/t_f	10 ns / 10 ns
NEP típico (900 nm, 20 V)	W / $\sqrt{Hz}$	1.2×10^{-14}
Corriente oscura (20 V)	I_d	1.0 nA (Típico), 20 nA (Máximo)
Capacitancia (20 V)	C_j	24 pF (Típico)
Encapsulado		SM05, Rosca Externa
Material del sensor		Si
Diodo correspondiente sin ennca		FDS100
Valores Máximos		
Voltaje máximo de polarización inversa		25 V
Corriente inversa máxima		5 mA
Temperatura de operación		-40 a 100 °C
Temperatura de almacenamiento		-55 a 125 °C

Tabla 2.1. Especificaciones del fotodiodo SM05PD1A.

La capacidad de respuesta, responsividad $\Re$ (λ), se puede leer en la curva de respuesta, mostrada en la **Figura 2.5**, para estimar la cantidad de fotocorriente generada dependiendo de la longitud de onda que se incide en el fotodiodo.

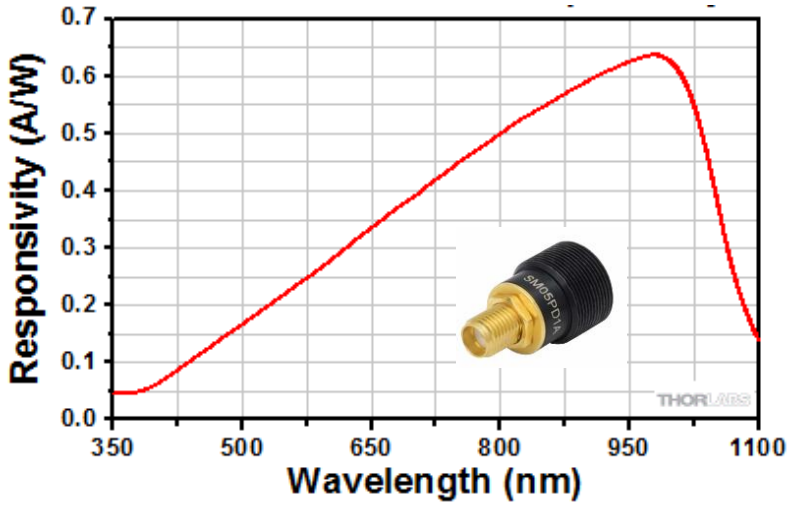


Figura 2.5. Rensponsividad del fotodiodo SM05PD1A.

- **Medición de la potencia óptica de diferentes fuentes de luz con Fotodetector comercial S120VC (Thorlabs)**

Con el objetivo de caracterizar la potencia óptica emitida por las fuentes de luz empleadas en el presente trabajo y contar con una referencia experimental confiable, se realizaron mediciones utilizando el **fotodetector comercial S120VC** de la marca **THORLABS**.

Las fuentes ópticas que se utilizaron fueron:

a) Diodo láser modelo **L980P100**, con emisión en λ = 980 nm, (NIR).
b) Diodo láser modelo **DL5147-042**, con emisión en λ = 655 nm, (vis-rojo).
c) Láser de estado sólido marca **Q-BAIHE**, con emisión en λ = 488 nm, (vis-azul).

Las mediciones se realizaron modulando la alimentación con el control del diodo laser modelo LCD220 para cada diodo y variando la alimentación en voltaje del láser de estado sólido, con el fin de analizar la variación de la potencia óptica emitida en función de la corriente. Para ello, se implementó el arreglo experimental mostrado en la **Figura 2.6**.

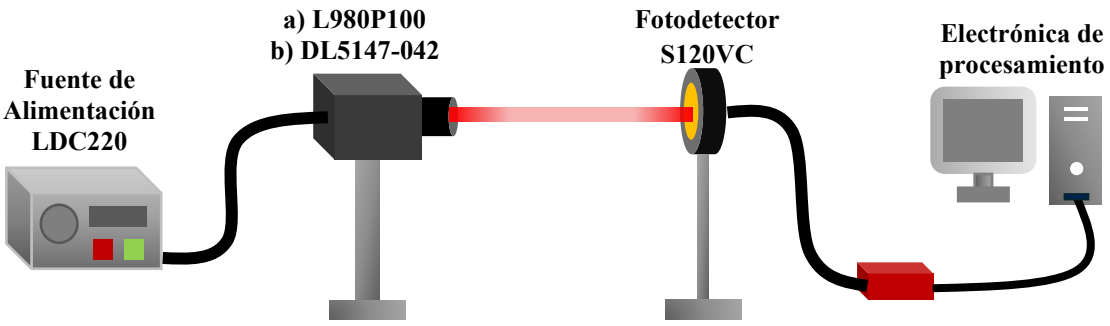


Figura 2.6. Diagrama arreglo experimental para mediciones de potencia de las fuentes a utilizar.

El arreglo experimental incluyo la alineación cada fuente óptica frente al fotodetector S120VC, asegurando centrar el haz sobre el área activa del detector y apagando las luces para evitar cualquier señal óptica no deseada. Se registraron los valores de potencia óptica correspondientes a diferentes valores de alimentación eléctrica, permitiendo obtener la relación entre corriente de alimentación y potencia óptica emitida. Con esto se obtuvieron valores de referencia para posteriormente hacer la comparación con el sistema detector desarrollado.

- **Validación del sistema de adquisición de voltaje**

Con el objetivo de verificar la confiabilidad del sistema de medición propuesto y desarrollado, se realizó una validación experimental de las lecturas de voltaje obtenidas mediante la tarjeta Arduino y la interfaz diseñada en LabVIEW.

La caída de voltaje en la resistencia de carga R_L fue medida mediante dos métodos independientes:

1. Medición directa utilizando un multímetro digital (**Figura 2.7**).
2. Medición a través del sistema de adquisición implementado, empleando Arduino y la visualización en tiempo real mediante LabVIEW (**Figura 2.8**).

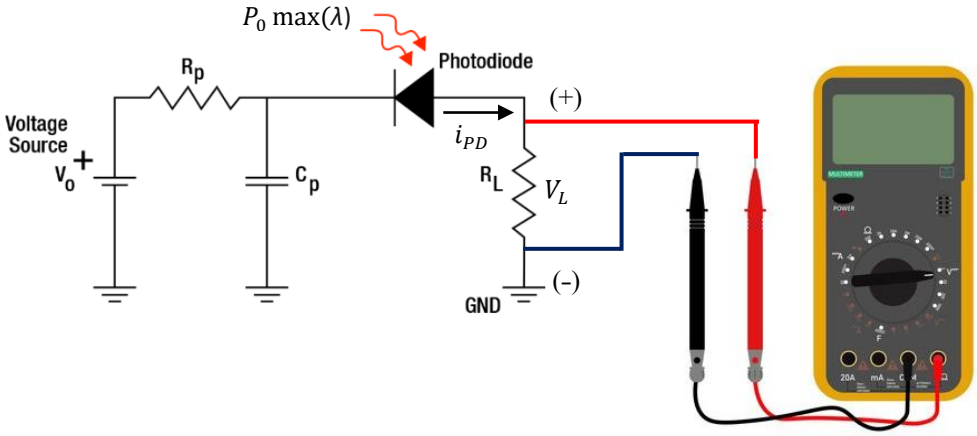


Figura 2.7. Arreglo experimental para la medición de voltaje V_L con multímetro.

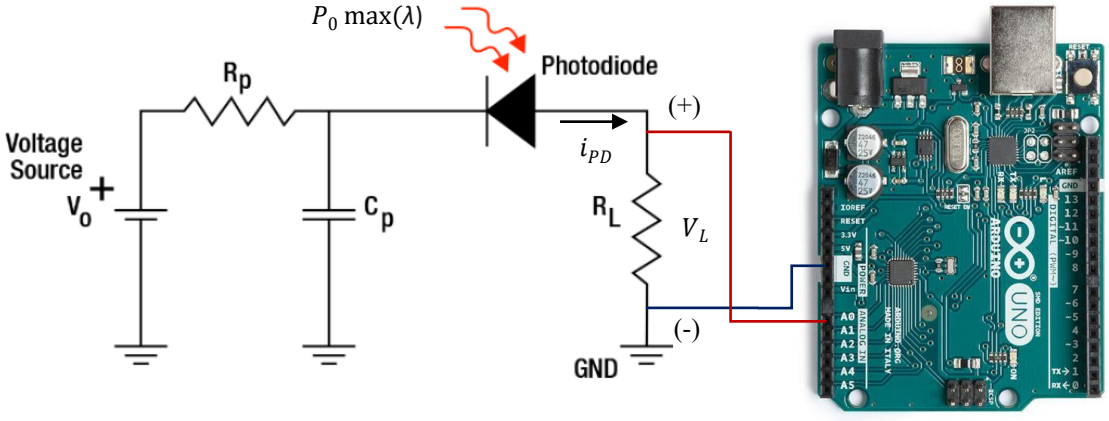


Figura 2.8. Arreglo experimental para la medición de voltaje V_L con Arduino.

Para esta etapa (método 2), se desarrolló una interfaz simple en LabVIEW cuya única función fue visualizar en tiempo real el valor de voltaje adquirido por el pin analógico A0. La pantalla de visualización permitía observar los valores en volts (V) y milivolts (mV) como se presenta en la **Fig. 2.9**. La comparación entre ambas mediciones, por Arduino y multímetro, permitió evaluar la respuesta del sistema propuesto, verificando la veracidad de las lecturas obtenidas.

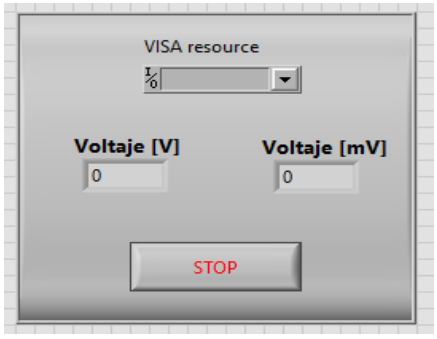


Figura 2.9. Panel frontal para la visualización de la medición de voltaje mediante Arduino con interfaz en LabVIEW.

- **Mediciones de potencia óptica empleando el sistema de detección propuesto: Fuente + CI+PD-SM05PD1A+Arduino/Interfaz LabVIEW**

Una vez determinadas las potencias ópticas de las fuentes de luz visibles mediante el detector calibrado S120VC de la marca THORLABS, se procedió a realizar las mediciones utilizando el sistema de detección desarrollado en este trabajo, conformado por el circuito integrado (CI) del fotodiodo SM05PD1A y la interfaz de adquisición basada en LabVIEW/Arduino.
El objetivo de esta etapa fue evaluar el desempeño del sistema de detección de potencia óptica propuesto mediante la comparación directa con un detector comercial, permitiendo analizar su precisión, linealidad y confiabilidad.
Se implementó el arreglo experimental de la **Figura 2.10**, manteniendo constantes las condiciones de alineación óptica y la distancia fuente–detector. Las mediciones se realizaron para diferentes valores de potencia óptica, controlados por la variación de la corriente de alimentación de las fuentes láser.

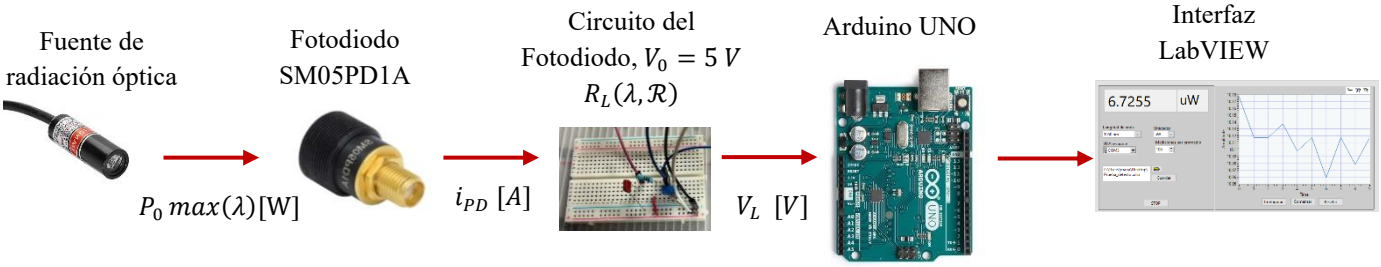


Figura 2.10. Estructura del sistema de detección implementado para la detección de señales ópticas.

b) Fotodiodo LSIPD-L1-B-0 (NIR)

Para el monitoreo de potencia óptica en longitudes de onda del infrarrojo cercano (NIR) se seleccionó un fotodiodo comercial de bajo costo, de arseniuro de indio y galio (InGaAs) **modelo LSIPD-L1-B-0** que tiene una longitud de operación entre los 800 nm a los 1700 nm. El modelo del fotodiodo utiliza una conexión tipo B (ánodo tierra). En la **Tabla 2.2** se muestran las especificaciones técnicas y en la **Figura 2.11** la gráfica de responsividad.

Especificaciones Fotodiodo LSIPD-L1-B-0			
Parámetro	**Símbolo**	**Unidad**	**Valor típico**
Diámetro activo	Φ	mm	1
Rango espectral	λ	nm	800 – 1700
Responsividad (V_R = 0V, λ = 1310,nm)	R_e	mA/mW	0.85
Responsividad (V_R = 0V, λ= 1550,nm)	R_e	mA/mW	0.90
Tiempo de respuesta (R_L = 50Ω, V_R = 5V)	T_R	ns	10
Corriente oscura (V_R = 0V)	I_d	nA	0.1
Corriente oscura (V_R = 5V)	I_d	nA	1
Voltaje de ruptura inversa (I_R = 10μA)	V_{BR}	V	30
Capacitancia de unión (f = 1MHz, V_R = 0V)	Cj	pF	1200
Capacitancia de unión (f = 1MHz, V_R = 5V)	Cj	pF	75
Potencia óptica de saturación (V_R = 5V)	P_s	mW	10
Voltaje de operación	V_R	V	0 – 5
Resistencia shunt (V_R = 10m)	R_{sh}	MΩ	100
Encapsulado	TO-46 hermético, con receptáculo o acoplamiento a fibra		

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del fotodiodo modelo **LSIPD-L1-B-0**.

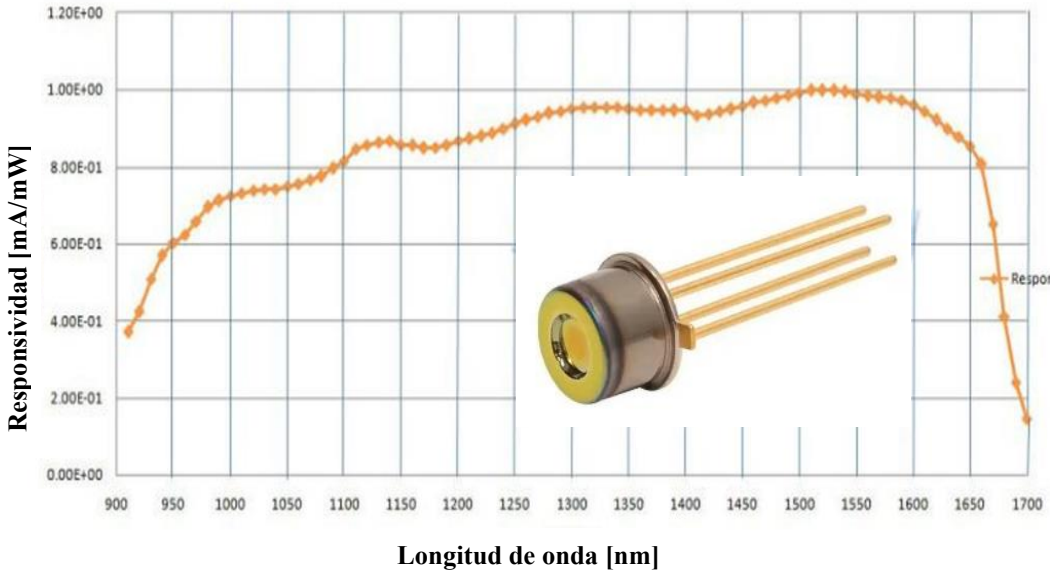


Figura 2.11. Responsividad del fotodiodo modelo **LSIPD-L1-B-0**.

c) Fotodiodo YA302PD (NIR)

Otro de los modelos que se utilizó para la región del infrarrojo fue el fotodiodo **modelo YA302PD** que opera en el rango espectral entre 800 nm y 1650 nm. El fotodiodo utiliza una conexión tipo B (ánodo tierra), a continuación, en la **Tabla 2.3** se muestran sus características técnicas y en la **Figura 2.12** la gráfica de su responsividad.

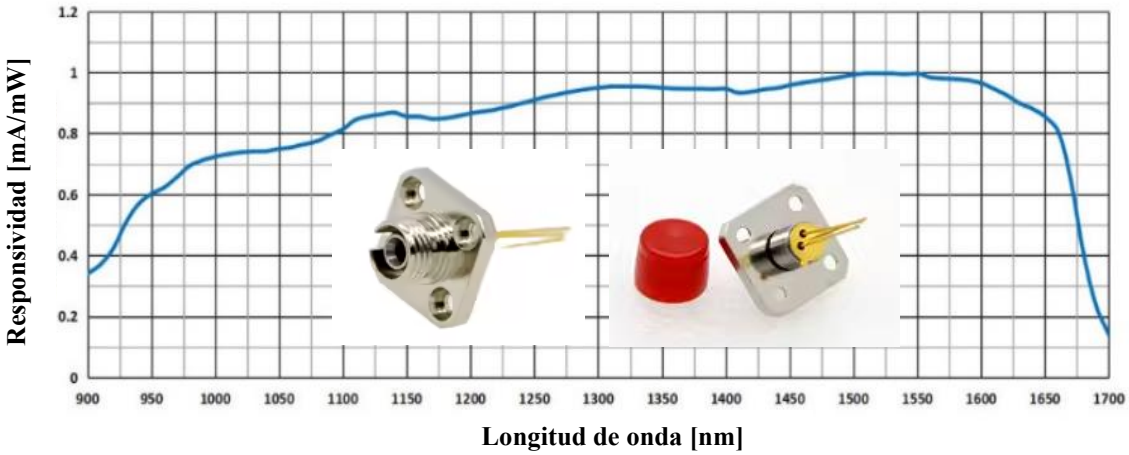


Figura 2.12. Rresponsividad correspondiente al fotodiodo modelo **YA302PD**.

Especificaciones Fotodiodo YA302PD

	Símbolo	Condiciones de prueba (Vr)	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo	Unidad
Responsividad a 1550 nm	R	−5 V	0.95	–	–	A/W
Responsividad a 1310 nm	Re	−5 V	0.90	–	–	A/W
Responsividad a 850 nm	Re	−5 V	0.40	–	–	A/W
Corriente oscura	Id	−5 V	–	–	5	nA
Longitud de onda de operación	λ	–	800	850 / 1310 / 1550	1650	nm
Diámetro del área fotosensible	Φ	–	–	0.3	–	mm
Ancho de banda	–	–	–	–	–	MHz
Capacitancia de unión	C	−5 V	–	4.6	6.0	pF
Voltaje de operación	Vr	–	–	–	−20	V
Temperatura de operación	–	–	−40	–	+85	°C
Temperatura de almacenamiento	–	–	−45	–	+100	°C

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del fotodiodo **modelo YA302PD**.

- **Medición de la potencia óptica de la fuente DHL-2000-BAL para 980nm, 1310nm y 1550 nm con PD-DXP-40D**

Para la caracterización de los fotodiodos previamente descritos se empleó una fuente de luz blanca modelo DHL-2000-BAL, la cual corresponde a una lámpara de halógeno–tungsteno con un rango de emisión desde la región VIS (210 nm) hasta la región NIR (2500 nm).

Las mediciones de la potencia óptica de salida a las longitudes de onda de interés se realizaron utilizando equipos calibrados disponibles en el laboratorio. Para ello, se utilizó un medidor de potencia de fibra óptica **modelo DXP-40D (MedPotOpt)**, el cual presenta un amplio rango de medición en las longitudes de onda de: 850 nm, 980 nm, 1300 nm, 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm y 1625 nm. Este equipo cuenta con una entrada tipo FC, por lo que fue necesario emplear un adaptador adicional para su conexión con la salida de la fibra óptica acoplada a

la fuente de luz blanca. En la **Figura 2.13 y 2.14** se muestran el arreglo experimental y la fotografía correspondiente implementada para las mediciones de potencia a la salida de la fuente de luz.

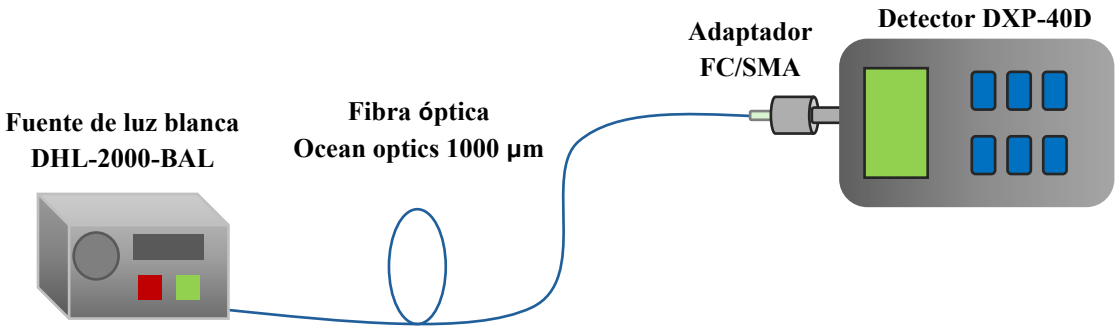


Figura 2.13. Diagrama del arreglo experimental para la medición de potencia con el **detector DXP-40D**.

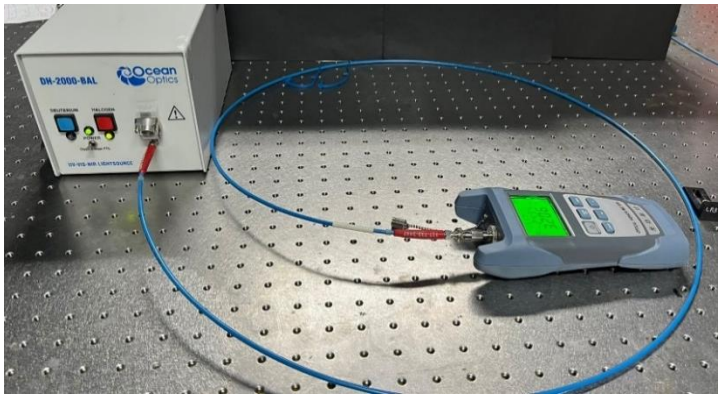


Figura 2.14. Fotografía del arreglo experimental para la medición de potencia con el **detector DXP-40D**.

2.3.1 Medición de la potencia óptica incorporando el sistema de detección propuesto: CI + fotodiodo LSIPD-L1-B-0 + Arduino/LabVIEW

Las pruebas de caracterización se llevaron a cabo mediante mediciones de potencia óptica utilizando la fuente de luz blanca DHL-2000-BAL. Estas mediciones se realizaron a longitudes de onda de 980 nm, 1310 nm y 1550 nm, empleando el arreglo experimental mostrado en la **Figura 2.15**.

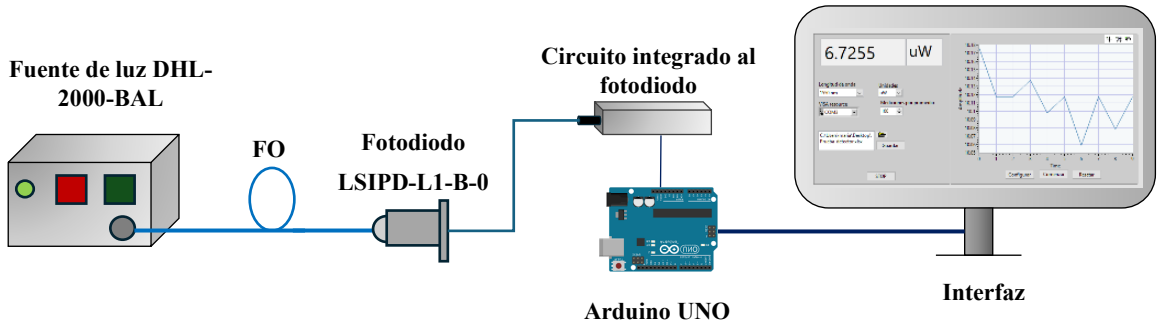


Figura 2.15. Diagrama del arreglo experimental para la medición de potencia óptica con el fotodiodo **LS1PD-L1-B-0 (NIR)**.

2.3.2 Medición de la potencia óptica incorporando el sistema de detección propuesto: CI+ fotodiodo YA302PD + Arduino/LabVIEW

De la misma manera las pruebas de caracterización para el fotodiodo modelo YA302PD se llevaron a cabo mediante mediciones de potencia óptica utilizando la fuente de luz blanca DHL-2000-BAL. Estas mediciones se realizaron a longitudes de onda de 1550 nm, 1500 nm y 1450 nm, empleando el arreglo experimental mostrado en la **Figura 2.16**.

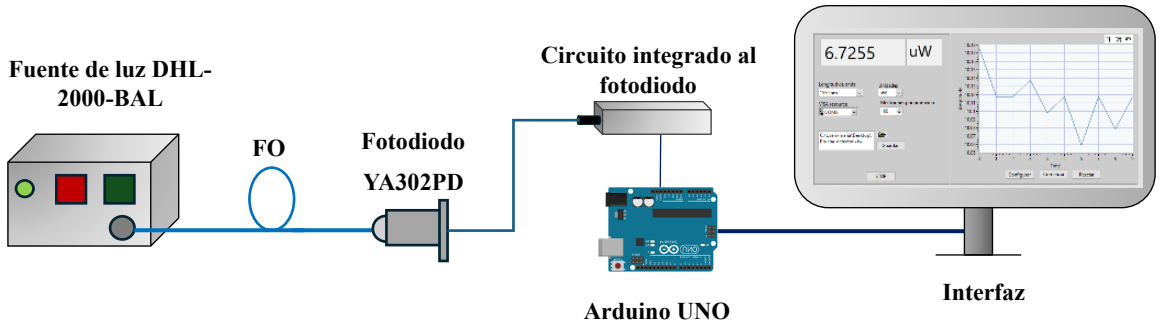


Figura 2.16. Diagrama del arreglo experimental para la medición de potencia óptica con el fotodiodo **YA302PD (NIR)**.

El fotodiodo YA302PD no se caracterizó de manera independiente, debido a que los resultados del fotodiodo LSIPD-L1-B-0 sirvieron como referencia ya que ambos dispositivos presentan las mismas características de operación y configuración de conexión; sin embargo, el fotodiodo YA302PD cuenta con un adaptador para fibra óptica con conector FC. Esta característica facilitó su integración en el montaje experimental, por lo que se utilizó en las mediciones posteriores para evaluar la respuesta del sistema ante variaciones del índice de refracción de diferentes soluciones.

2.4 SENSOR DE FIBRA OPTICA ADELGAZADA

En esta sección se describe el desarrollo del sensor de fibra óptica adelgazada (S-FOA). En este tipo de sensor, la fibra es sometida a un proceso de adelgazamiento controlado en una sección determinada, dando lugar a una estructura conocida como *TFO de fibra óptica*. Esta región adelgazada funciona como el elemento transductor del sensor, ya que la reducción de su diámetro incrementa la interacción del campo evanescente con el medio circundante, lo que la fibra tiene una mayor sensibilidad ante variaciones en el índice de refracción del entorno.

2.4.1 Fabricación de las microestructuras

Para la fabricación de fibras ópticas adelgazadas (FOA), comúnmente denominadas "*taper de fibra óptica*" o bien TFO, se empleó una fibra óptica multimodo de índice gradual. Los diámetros del núcleo y del revestimiento fueron de 62.5/125 μm, con una apertura numérica de 0.14. El proceso se realizó empleando la técnica de calentamiento y estiramiento mediante un quemador viajero con una pequeña llama, lo que permitió controlar el adelgazamiento de la fibra, tal como se describe en [1].

Antes de iniciar el mecanismo de fabricación, es necesario preparar la fibra, retirando el recubrimiento para obtener una zona desnuda que pueda ser estirada en el sistema de calentamiento. Los pasos de preparación son los siguientes:

1. Se corta un tramo de fibra óptica multimodo de aproximadamente 90 cm de longitud.
2. Se localiza la parte central del tramo cortado.
3. Se retira la cubierta de la fibra hasta llegar al revestimiento a lo largo de unos 4 cm.
4. Se limpia la fibra con alcohol isopropílico para eliminar restos de suciedad o pelusa.

Al finalizar este procedimiento, se obtiene una sección de aproximadamente 4 cm de fibra desnuda, adecuada para la fabricación del TFO que fue obtenido con los valores de velocidad de oscilación del mechero de $v_0 = 6\, mm/s$ y velocidad de deslazamiento de los postes de $v = 4.5\, mm/min$. El diseño y la técnica de fabricación se llevaron a cabo con lo descrito en [12]. La **Figura 2.17** muestra el montaje de la fibra óptica dentro del sistema de estiramiento.

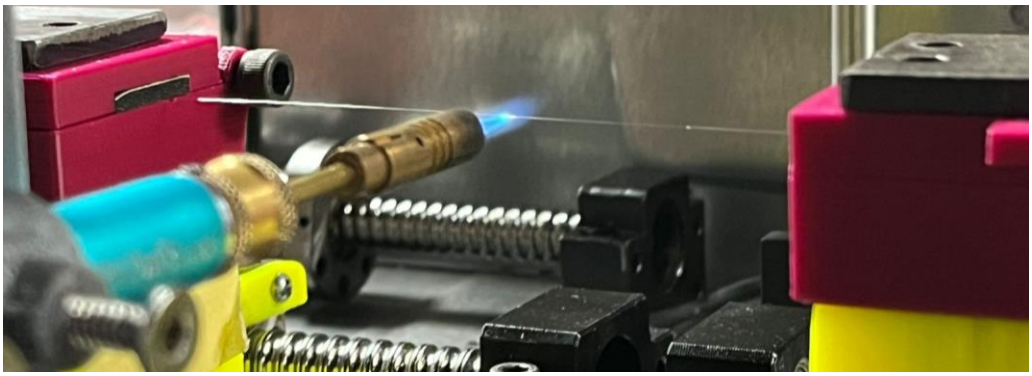


Figura 2.17. Fibra óptica colocada en el sistema de calentamiento estirado para adelgazarla.

2.4.2 Caracterización geométrica

Posteriormente a la fabricación de los *TFO*, se tomaron imágenes con el microscopio óptico para determinar la geometría de las fibras. Antes de capturar las imágenes, se procedió con la calibración del microscopio con la ayuda de la hoja de calibración que viene incluida en el equipo, como podemos observar en la **Figura 2.18**.



Figura 2.18. Microscopio óptico y hoja de calibración.

En las imágenes obtenidas se identifican claramente la zona sin modificar, la zona de transición y la zona de la cintura de las fibras ópticas adelgazadas (FOA), como se muestra en la **Figura 2.19**.

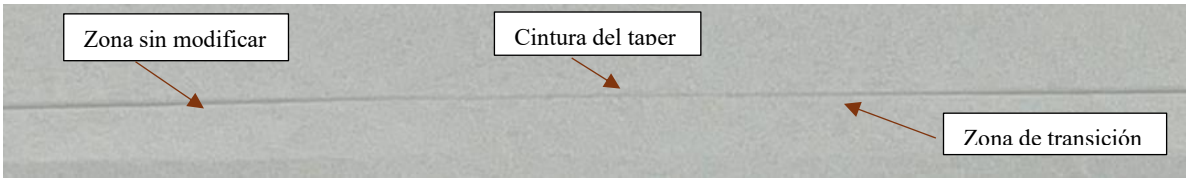


Figura 2.19. Fotografía de una fibra óptica adelgazada obtenida durante el proceso de fabricación para una cintura de 30µm.

2.4.3 Respuesta espectral de las microestructuras

Para la obtención de los espectros de transmisión de las microestructuras fabricadas, se implementó el arreglo experimental mostrado en la **Figura 2.20**. El arreglo experimental incluye un *TFO* conectado a una fuente de luz de deuterio-halógeno que emite una señal óptica en un rango espectral del infrarrojo cercano, mientras el *TFO* está fijado en una placa de acrílico para tener un mejor manejo de este. El otro extremo del *TFO* está conectado al espectrómetro modelo *NIR-512* para realizar las mediciones del espectro en la zona de infrarrojo cercano y en el caso para el visible se utilizó el espectrómetro modelo S2000.

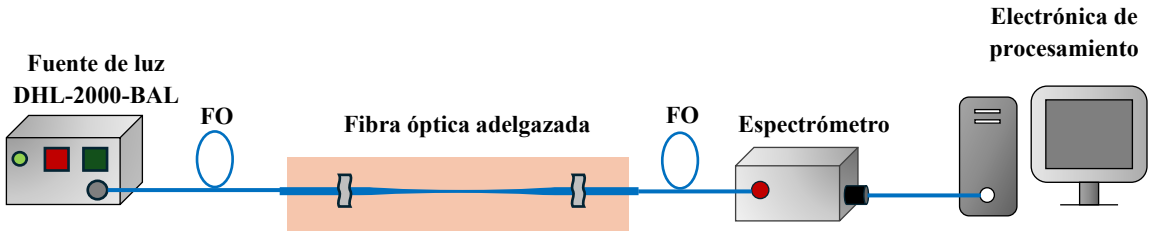


Figura 2.20. Diagrama del arreglo experimental para la medición de espectros para las diferentes fibras ópticas estrechadas.

2.5 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN PROPUESTO EN UN SENSOR DE FIBRA ÓPTICA

Para evaluar la capacidad de operación el sistema de detección de señales ópticas propuesto se integró a un sensor basado en una fibra óptica adelgazada(S-FOA). En este sensor, la fibra óptica adelgazada actúa como elemento transductor, ya que el adelgazamiento controlado de una sección a lo largo de la fibra permite detectar variaciones en el índice de refracción del medio circundante.

Para llevar a cabo las pruebas de operación del sistema sensor óptico, se consideró la detección de cambios en el índice de refracción. Se prepararon soluciones acuosas a diferentes concentraciones, utilizando jamaica (flor), sacarosa y glucosa. Las variaciones en la potencia óptica para diferentes concentraciones fueron detectadas a la salida del sensor y fueron registradas con el sistema de detección de señales ópticas que diseñamos y presentamos en la sección pasada.

2.5.1 Preparación de soluciones acuosas

a) Sacarosa

Las soluciones acuosas de sacarosa (azúcar refinada) se prepararon mediante la disolución de diferentes cantidades de soluto (25g, 50g, 75g y 100g) en 100 mL de agua ultrapura. Para la preparación de cada solución se utilizó un vaso de precipitados y un agitador magnético, disolviendo la cantidad correspondiente de sacarosa en agua ultrapura como se observa en la imagen de la **Figura 2.21**. Las muestras se identificaron mediante etiquetas de 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, respectivamente, de acuerdo con la cantidad de sacarosa empleada, en la **Figura 2.22** se presentan las muestras obtenidas.

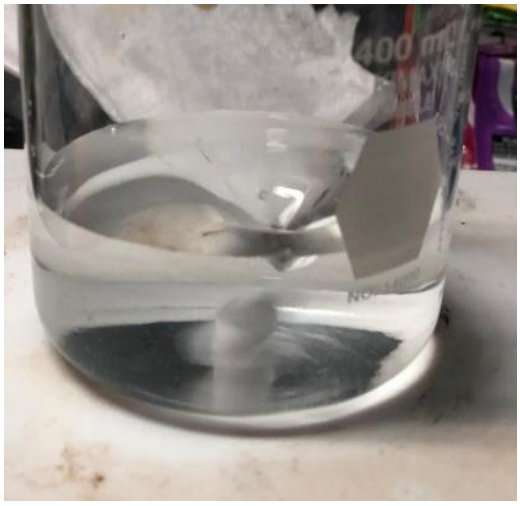


Figura 2.21. Agitación de la solución de sacarosa mediante agitador magnético durante el proceso de preparación de las diferentes concentraciones.

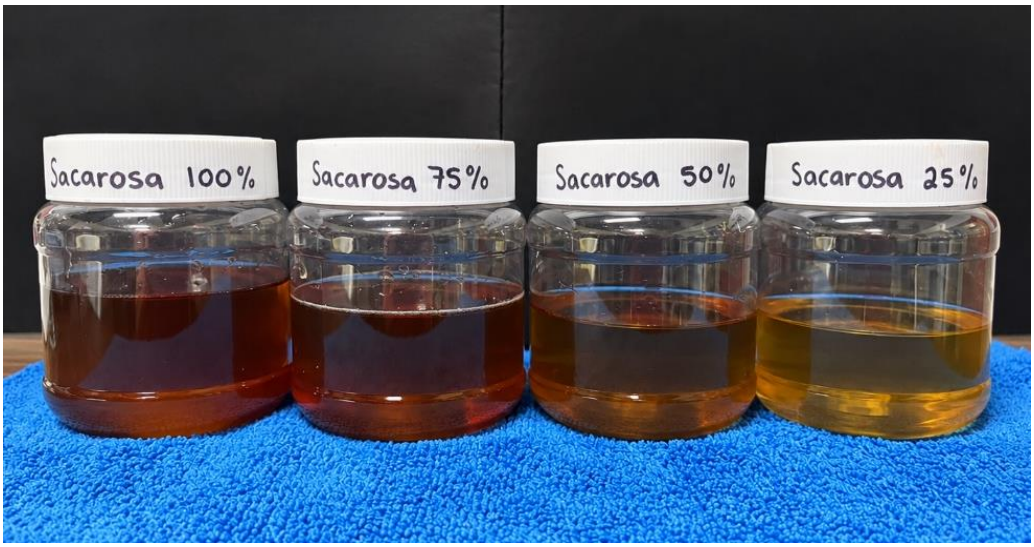


Figura 2.22. Muestras de soluciones de sacarosa preparadas a diferentes concentraciones: 100 %, 75 %, 50 % y 25 %.

b) Glucosa

Las soluciones acuosas de glucosa se prepararon siguiendo el mismo procedimiento empleado para las soluciones de sacarosa. Se prepararon mediante la disolución de diferentes cantidades de soluto (25g, 50g, 75g y 100g) en 100 mL de agua ultrapura. Las muestras se identificaron mediante etiquetas de 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, respectivamente, de acuerdo con la cantidad de glucosa empleada.

A diferencia del procedimiento utilizado para la sacarosa, durante la preparación de las soluciones de glucosa se aplicó calentamiento controlado mediante una parrilla (**Figura 2.23**), con el fin de favorecer la disolución completa de la glucosa en la **Figura 2.24** se presentan las muestras obtenidas. Una vez obtenidas las soluciones, se determinaron sus índices de refracción empleando un refractómetro, manteniendo la temperatura ambiente constante a 25 °C durante todas las mediciones.

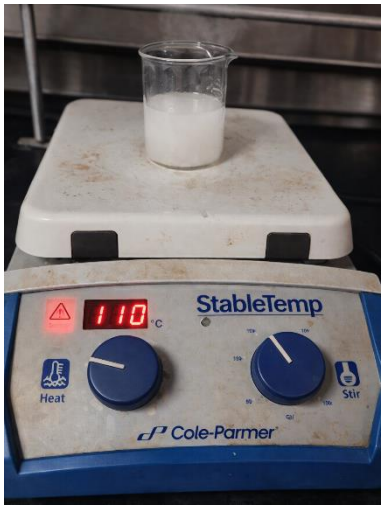


Figura 2.23. Calentamiento controlado de las soluciones de glucosa mediante una parrilla con agitación magnética para favorecer su disolución.

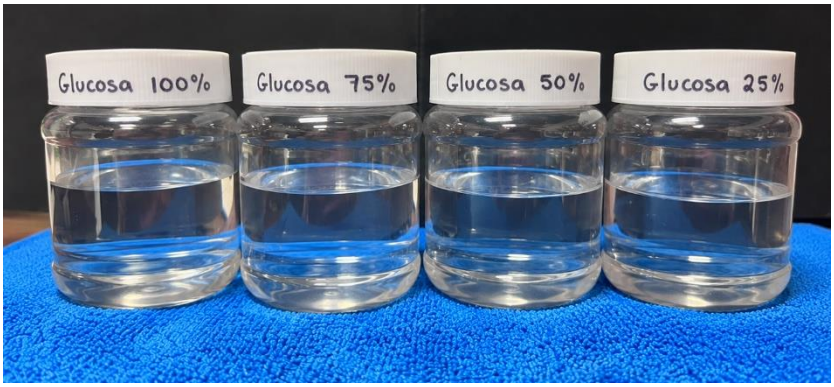


Figura 2.24. Muestras de soluciones de glucosa preparadas a diferentes concentraciones: 100 %, 75 %, 50 % y 25 %.

c) Jamaica

Para la preparación de las soluciones de jamaica se realizaron tres procedimientos experimentales independientes, variando tanto la relación masa/volumen de la jamaica como el tiempo de extracción. Lo anterior con el objetivo de obtener las concentraciones a particulares índices de refracción de las soluciones acuosas.

- En el primer procedimiento, se preparó una solución utilizando 100 gr. de jamaica en 100 mL de agua ultrapura, la cual se dejó en reposo durante 72 h con el propósito se extraer la mayor concentración posible.
- En el segundo procedimiento, se emplearon 50 gr. de jamaica disueltos en 150 mL de agua ultrapura, manteniendo igualmente un tiempo de reposo de 72 h.
- Finalmente, en el tercer procedimiento se preparó una solución utilizando 200 g de jamaica en 500 mL de agua destilada; en este caso, se extrajeron muestras de la solución a 0 h, 1 h y 12 h de remojo. Las muestras obtenidas se almacenaron bajo

refrigeración y posteriormente se determinaron sus índices de refracción. (**Figura. 2.25**).



Figura 2.25. Soluciones acuosas obtenidas de diferentes concentraciones de jamaica.

2.5.2 Medición del índice de refracción de las soluciones para diferentes concentraciones

Una vez obtenidas las diferentes concentraciones, se determinaron los índices de refracción de cada solución, así como el del agua ultrapura, empleando un refractómetro modelo PAL-BX/RI que tiene una resolución de 0.0001 en índice de refracción y Brix ±0.1% (Ver **Figura 2.26)**. La temperatura ambiente registrada durante todas las mediciones se mantuvo constante a 25 °C. Se llevaron acabo al menos tres diferentes mediciones con el refractómetro, manteniendo un valor invariable en las diferentes mediciones de los soluciones.

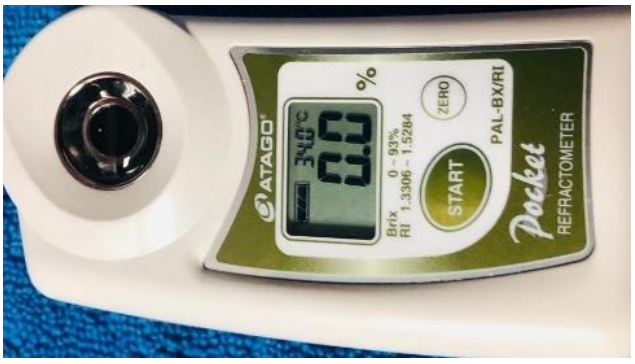


Figura 2.26. Refractómetro (Pocket PAL-BX/RI).

2.5.3 Medición de la respuesta espectral de las diferentes soluciones acuosas bajo prueba.

Posteriormente, se caracterizó el espectro de transmisión de las muestras utilizando una fuente de luz de deuterio-halógeno que emite en un rango espectral amplio, mientras el *TFO* está fijado en una base plástica que permitió colocar las diferentes soluciones de forma controlada. El otro extremo del *TFO* está conectado al espectrómetro modelo NIR-512 para la respuesta en NIR y el modelo S2000 para la respuesta en VIS, el arreglo empleado se muestra en la **Figura 2.27**.

Para cada medición, la solución correspondiente se aplicaba cuidadosamente sobre el *TFO*, y al finalizar se retiraba con una pipeta. A continuación, el área se enjuagaba con agua ultrapura para eliminar residuos antes de añadir la siguiente muestra. Este procedimiento se repitió para cada concentración, asegurando que se registrara nuevamente el espectro de referencia antes de cada medición.

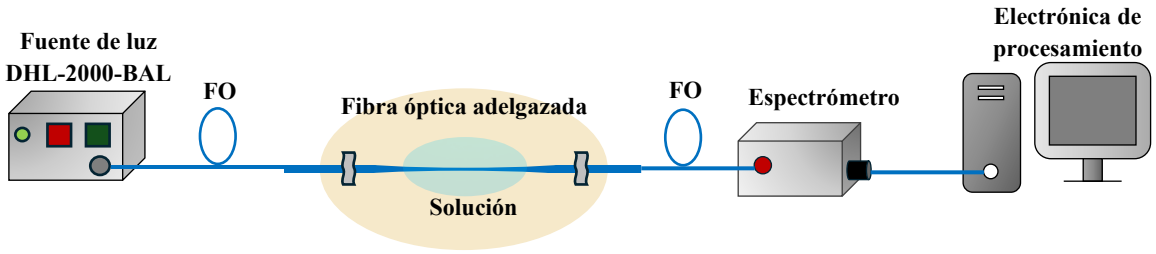


Figura 2.27. Diagrama del arreglo experimental para la medición de espectros para las diferentes soluciones bajo prueba.

2.5.4 Medición de la respuesta óptica del sistema sensor propuesto incorporando: CI + Fotodiodo + TFO (sensor) + Arduido/LabView para las diferentes soluciones bajo prueba.

Finalmente, se realizaron mediciones de potencia óptica utilizando el sistema de detección óptica (SDO) propuesto y desarrollado en el cual se integró un sensor de fibra óptica adelgazada y un sistema de adquisición y procesamiento de datos implementado en Arduino–LabVIEW. Para cada experimento, se seleccionó el fotodiodo correspondiente a la longitud de onda de análisis.

En el caso de las **soluciones de sacarosa**, se realizaron mediciones de potencia óptica a longitudes de onda de 1450 nm, 1500 nm y 1550 nm, utilizando el **fotodiodo YA302PD**. Para las **soluciones de jamaica**, las pruebas se realizaron a longitudes de onda de 525 nm,

532 nm, 575 nm y 600 nm, utilizando el **fotodiodo SM05PD1A**. Por último, las soluciones de **glucosa** se evaluaron a 1310 nm, 1450 nm, 1490 nm y 1550 nm, nuevamente con el **fotodiodo YA302PD**.

El arreglo experimental empleado en todas las mediciones se muestra en la **Figura 2.28** y **Figura 2.29**. Dicho arreglo consiste en una fuente de luz blanca modelo DHL-2000-BAL, cuya salida se acopló a la fibra óptica adelgazada (S-FOA), la cual se colocó sobre una base que permitió la aplicación controlada de las distintas soluciones. La salida de la potencia óptica del sensor fue recibida por el sistema de detección, el cual integra el fotodiodo correspondiente, su circuito integrado y una placa Arduino UNO, encargada de la adquisición de la caída de voltaje $V_L$en la resistencia de carga R_L y la interfaz desarrollada en LabVIEW.

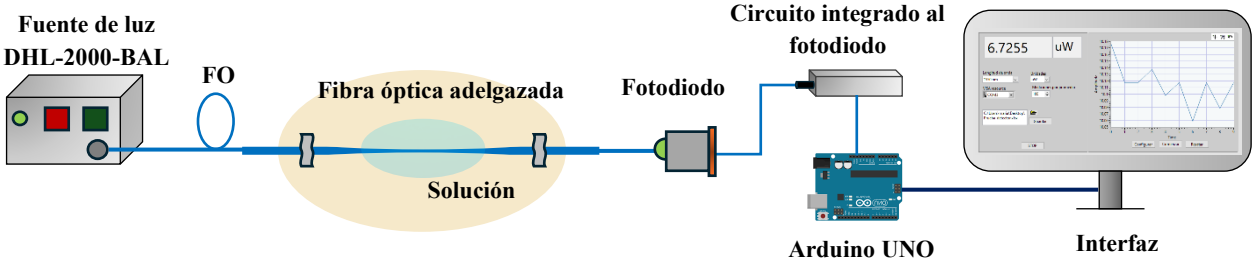


Figura 2.28. Diagrama del arreglo experimental para la medición de potencia óptica en diferentes soluciones bajo prueba.

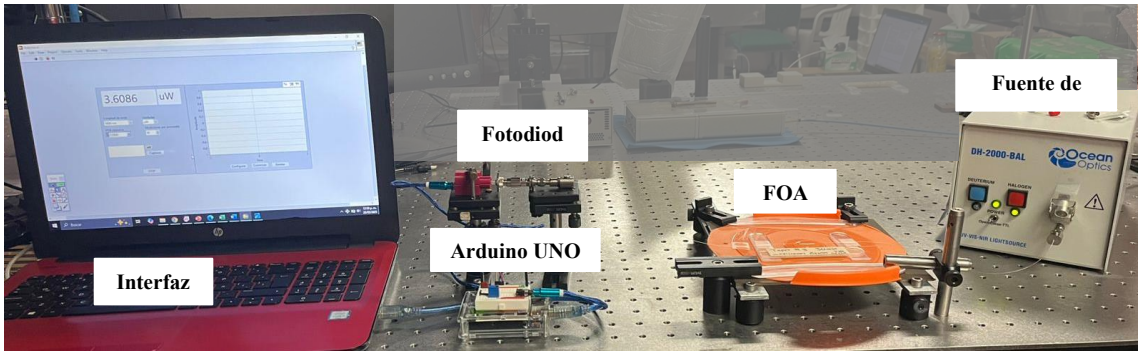


Figura 2.29. Fotografía del montaje experimental en el laboratorio para la medición de potencia óptica en las diferentes soluciones.

CAPITULO 3: RESULTADOS

3.1 RESUMEN

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos durante el desarrollo y caracterización del sistema de detección óptica basado en una tarjeta Arduino y programación gráfica en LabVIEW. Inicialmente, se presentan los resultados correspondientes a la implementación de los circuitos integrados a los fotodiodos y la validación del sistema de adquisición de voltaje. Posteriormente, se analiza la respuesta del sistema de detección en las regiones visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético, mediante mediciones de potencia óptica para diferentes longitudes de onda.

Asimismo, se presentan los resultados de la caracterización geométrica y espectral de la fibra óptica adelgazada utilizada como elemento transductor. Finalmente, el sistema de detección desarrollado se integra al sensor de fibra óptica para evaluar su respuesta ante variaciones en el índice de refracción de soluciones acuosas con diferentes índices de refracción. Los resultados obtenidos permiten evaluar el desempeño del sistema propuesto para la adquisición, procesamiento y visualización de señales provenientes de un sensor de fibra óptica.

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN BASADO EN PROGRAMACIÓN LABVIEW Y UNA TARJETA ARDUINO

3.2.1 Diseño del circuito integrado a los fotodiodos

- **Diseño del circuito integrado (CI) incorporando el fotodiodo SM05PD1A**

En la **Figura 3.1** se presenta el circuito electrónico sugerido para la implementación del fotodiodo modelo SM05PD1A. Este circuito opera en configuración tipo A.

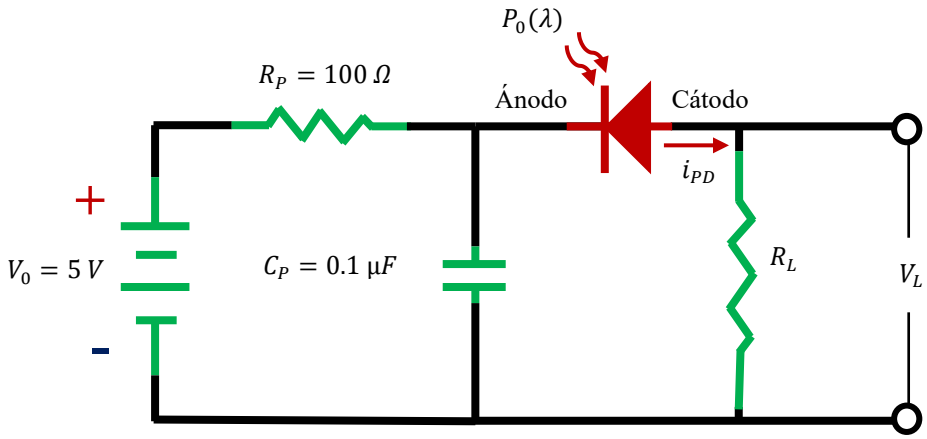


Figura 3.1. Circuito integrado al fotodiodo SM05PD1A.

El valor de la resistencia de carga $\boldsymbol{R_L}$ depende de la potencia óptica incidente $\boldsymbol{P_0}$, el voltaje de polarización $\boldsymbol{V_0}$ y de la responsividad del fotodiodo $\Re$ a la longitud de onda de operación, como se definió en la Ecuación 5. Por lo tanto, se realizaron cálculos para determinar que resistencia de carga utilizar para estas tres diferentes fuentes ópticas empleadas.

Para la caracterización experimental del fotodiodo SM05PD1A se utilizaron tres fuentes de radiación óptica:

a) Un diodo láser con emisión en $\boldsymbol{\lambda = 980}$nm.
b) Un diodo láser con emisión en $\boldsymbol{\lambda = 655}$nm.
c) Un láser de estado sólido con emisión en $\boldsymbol{\lambda = 408}$nm.

Como criterio de diseño, se estableció un límite máximo de potencia óptica medible $\boldsymbol{P_{0max}}$ de 5 mW, considerando un voltaje de polarización $\boldsymbol{V_0}$ de 5 V.

A partir de estos parámetros, los valores de las resistencias de carga $\boldsymbol{R_L}$correspondientes a cada longitud de onda fueron calculados utilizando la Ecuación (6) y se obtuvieron los siguientes resultados:

Fotodiodo SM05PD1A (vis)		
Potencia P_{0max}	5 mW	
Longitud de onda [nm]	**Responsividad [A/W]**	**Resistencia de carga R_L [Ω]**
980	0.637	1570
655	0.3405	2937
488	0.154	6494

Tabla 3.1. Valores calculados de resistencia de carga para el fotodiodo SM05PD1A a las diferentes longitudes de onda de operación.

Los resultados muestran que el valor requerido de $\boldsymbol{R_L}$ disminuye a medida que aumenta la responsividad del fotodiodo. Para (λ =488) nm, donde el SM05PD1A presenta la menor responsividad de las tres longitudes de onda consideradas, se requiere el mayor valor de resistencia de carga. En contraste, para (λ =980) nm, la mayor responsividad permite utilizar una resistencia de menor valor. De esta manera, la resistencia de carga se seleccionó de acuerdo con la longitud de onda de operación para mantener el voltaje de salida dentro del intervalo de adquisición establecido para el sistema.

- **Diseño del circuito integrado incorporando los fotodiodos b) LSIPD-L1-B-0 (NIR) y c) YA302PD (NIR)**

Para los fotodiodos LSIPD-L1-B-0 y YA302PD se diseñó un circuito con polarización inversa que incorpora un arreglo RC como protección frente a posibles variaciones o sobrecargas eléctricas. En la **Figura 3.2** se muestra el circuito implementado para ambos fotodiodos. En esta configuración, el cátodo se encuentra conectado al potencial positivo y la resistencia de carga $\boldsymbol{R_L}$ al ánodo, correspondiente a una configuración tipo B.

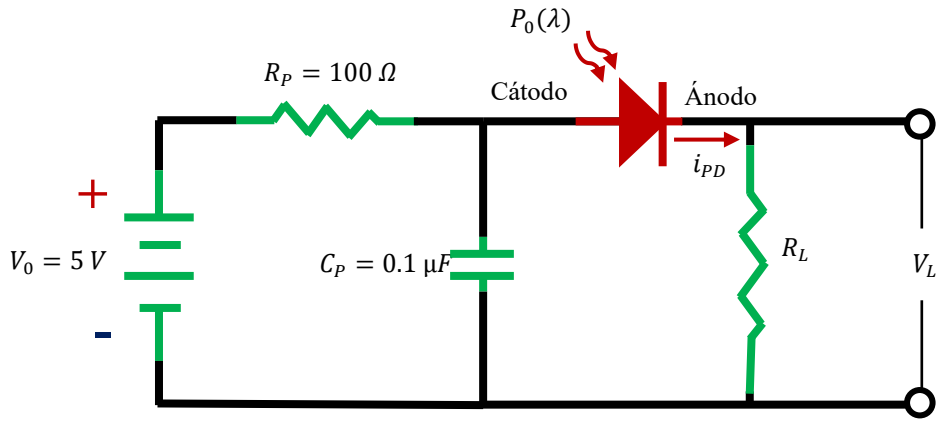


Figura 3.2. Circuito Integrado a los fotodiodos *LSIPD-L1-B-0 (NIR)* y *YA302PD (NIR)*.

Para el diseño del circuito integrado del fotodiodo LSIPD-L1-B-0 se consideraron longitudes de onda de 1550 nm, 1310 nm y 980 nm. Bajo estas condiciones, se calcularon las resistencias de carga R_L, estableciendo una potencia óptica máxima de operación P_{0max}de 15 µW y un voltaje de polarización V_0de 5 V. Las resistencias de carga se determinaron con base en la Ecuación (6).

Fotodiodo LSIPD-L1-B-0 (NIR)		
Potencia P_{0max}	15 µW	
Longitud de onda [nm]	**Responsividad [A/W]**	**Resistencia de carga R_L [KΩ]**
1550	0.95	350.87
1310	0.99	336.70
980	0.70	476.19

Tabla 3.2. Valores de resistencia de carga calculados en función de la longitud de onda, responsividad y potencia óptica máxima establecida para el fotodiodo LSIPD-L1-B-0 (NIR).

De manera similar, para la caracterización del fotodiodo YA302PD se consideraron longitudes de onda de 1550 nm, 1500 nm y 1450 nm. En este caso, las resistencias de carga R_L se calcularon fijando una potencia óptica máxima de operación P_{0max} de 20 μW y un voltaje de polarización V_0 de 5 V, de acuerdo con la Ecuación (3) los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Fotodiodo YA302PD (NIR)		
Potencia P_{0max}	20 μW	
Longitud de onda [nm]	**Responsividad [A/W]**	**Resistencia de carga R_L [Ω]**
1550	0.99	252.525 KΩ
1500	0.99	252.525 KΩ
1450	0.95	263.157 KΩ

Tabla 3.3. Valores de las resistencias de carga calculados en función de la longitud de onda, responsividad y potencia óptica máxima establecida el fotodiodo YA302PD (NIR).

3.2.2 Integración del sistema de adquisición y visualización de datos

Una vez implementados los circuitos integrados a los fotodiodos, la señal de voltaje V_L fue adquirida a través del pin analógico A0. La **Figura 3.3** ilustra la asignación de pines utilizada en la tarjeta Arduino y las conexiones que se hicieron con el CI a los fotodiodos.

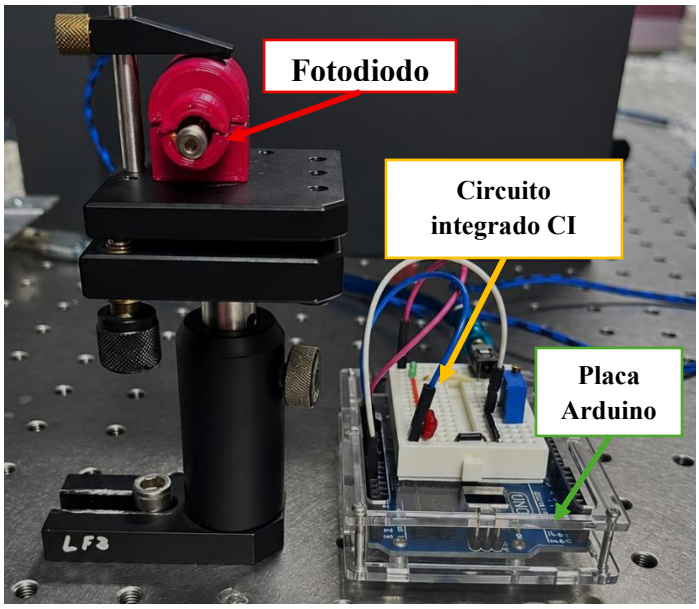


Figura 3.3. Conexión entre el circuito integrado al fotodiodo y la placa Arduino UNO.

La señal adquirida a través del pin A0 fue convertida a un valor digital mediante el convertidor analógico-digital (ADC) de la tarjeta Arduino y posteriormente enviada a la computadora mediante comunicación serial para su procesamiento y visualización en LabVIEW. El diagrama de bloques de la **Figura 3.4** muestra el programa para establecer la comunicación con la tarjeta Arduino UNO mediante el protocolo serial.

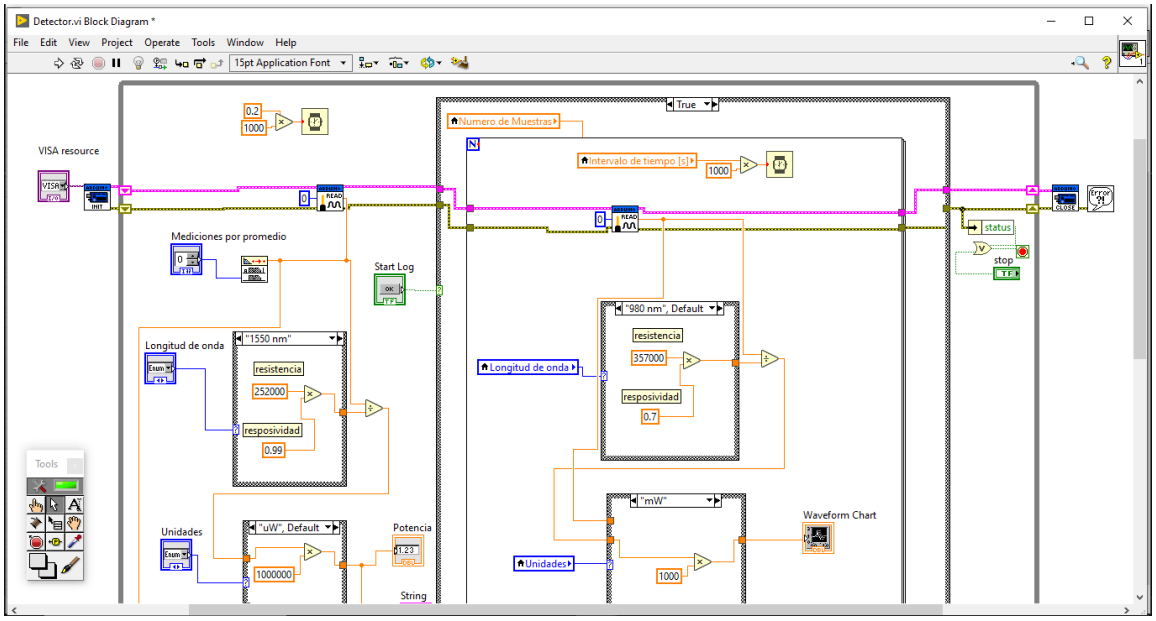


Figura 3.4. Diagrama de bloques en LabVIEW para la adquisición y visualización en tiempo real de la señal del fotodiodo.

Finalmente, se desarrolló una **interfaz gráfica** para visualizar la señal adquirida por el sistema. Como se muestra en la **Figura 3.5**, el programa permite seleccionar la longitud de onda de operación, λ_{oper}, las unidades de potencia y el puerto de comunicación serial utilizado por la tarjeta Arduino. Además, permite establecer el número de mediciones utilizadas para calcular el valor promedio de la señal.

La potencia óptica calculada se presenta mediante un indicador numérico y, simultáneamente, su comportamiento se visualiza en tiempo real mediante una gráfica. La interfaz incorpora también una función para almacenar los datos adquiridos, permitiendo seleccionar la ubicación y el archivo correspondiente para su posterior análisis.

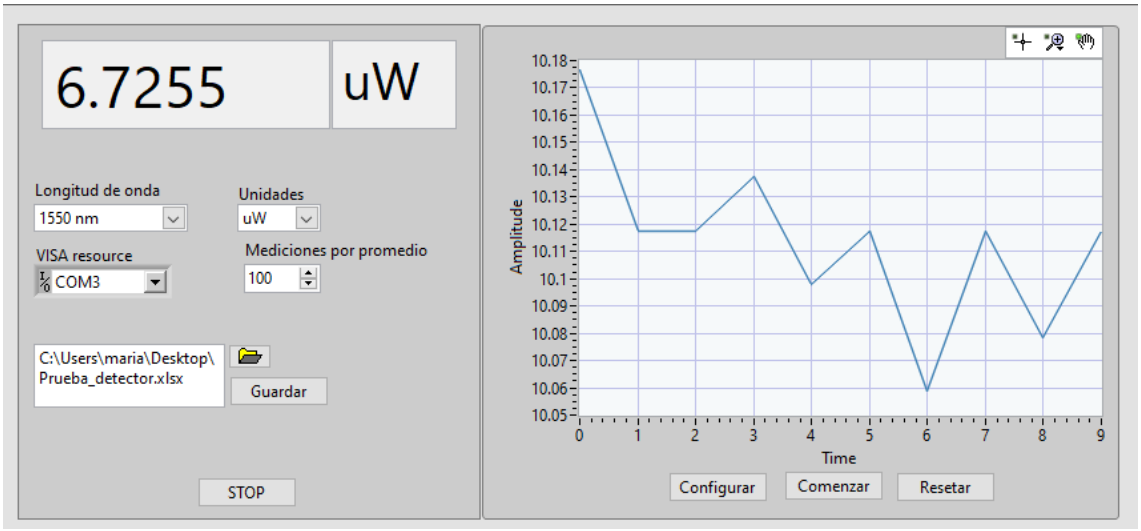


Figura 3.5. Panel frontal de la interfaz diseñada en LabVIEW.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN EN LA REGIÓN (VIS-NIR)

3.3.1 Respuesta óptica de las diferentes fuentes de luz

Inicialmente, se caracterizó la respuesta óptica de las fuentes de luz utilizadas para evaluar el sistema de detección desarrollado. Como se describió en el Capítulo 2, la potencia óptica emitida por cada fuente fue medida utilizando el **fotodetector comercial S120VC (Thorlabs)** como instrumento de referencia, de acuerdo con el arreglo experimental mostrado en Capitulo 2.

Para los diodos láser con emisión a **λ=655 nm y λ=980 nm**, la potencia óptica de salida fue medida para diferentes valores de corriente de alimentación suministrados mediante el

controlador LCD220. Por otra parte, para el láser de estado sólido con emisión a **λ=488 nm**, las mediciones se realizaron variando su voltaje de alimentación del diodo.

En la **Figura 3.6** se presenta una fotografía del montaje experimental utilizado para la medición de la potencia óptica del diodo laser **DL5147-042** que emite a una $\boldsymbol{\lambda = 655\ nm}$.

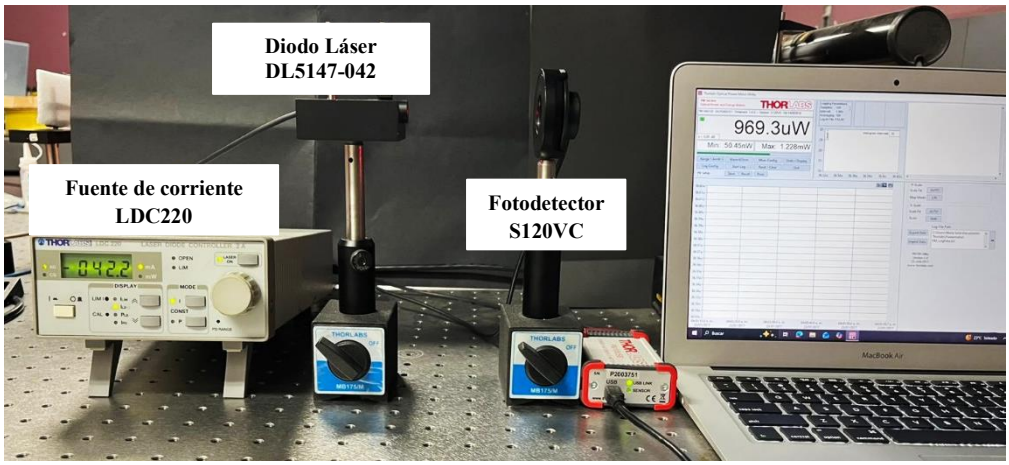


Figura 3.6. Fotografía del arreglo experimental implementado para mediciones de potencia del diodo laser DL5147-042 que emite a $\lambda = 655\ nm$.

En las **Figuras 3.7, 3.8 y 3.9** se presenta la potencia óptica medida con el **fotodetector S120VC** en función de la alimentación eléctrica aplicada a las fuentes con emisión a **488, 655 y 980 nm,** respectivamente. Estos resultados permitieron determinar el intervalo de potencia óptica utilizado posteriormente para la caracterización del sistema de detección desarrollado.

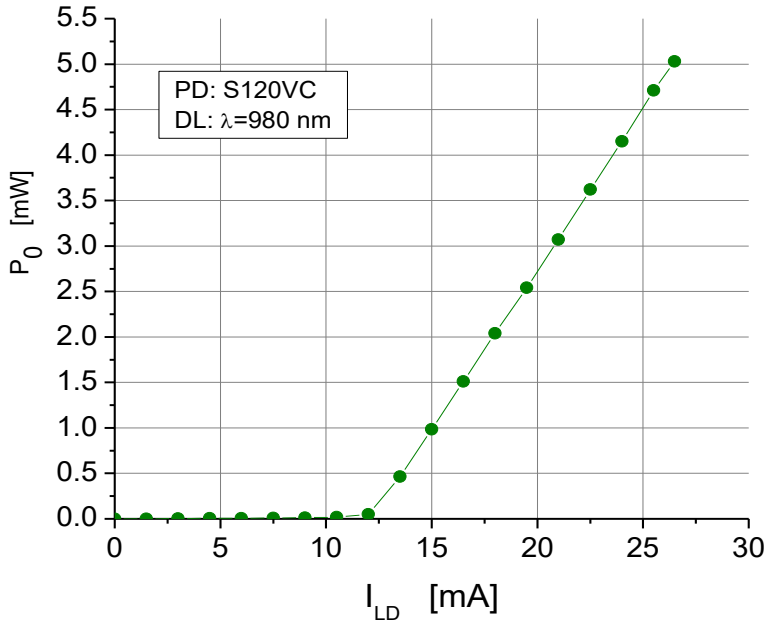


Figura 3.7. Potencia óptica medida del diodo laser 980 nm utilizando el fotodetector S120VC.

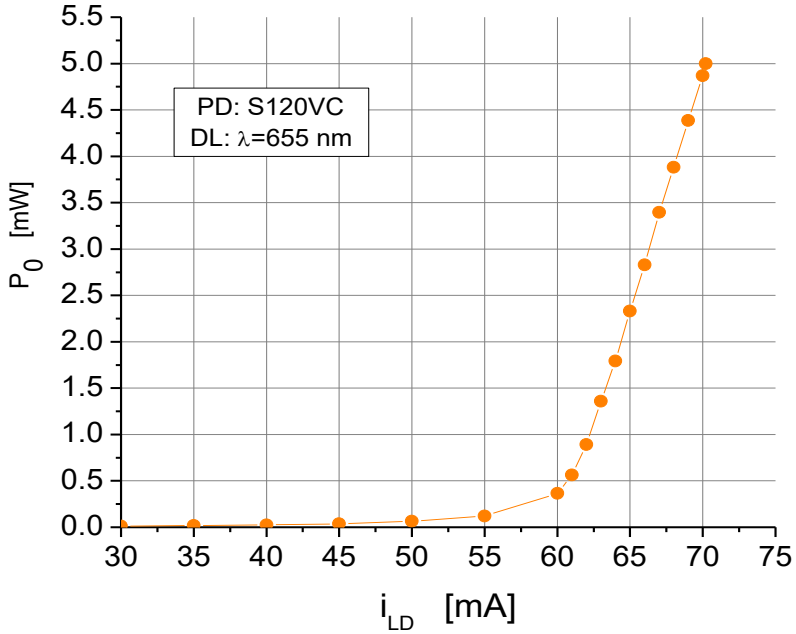


Figura 3.8. Potencia óptica medida del diodo laser a 655 nm utilizando el fotodetector S120VC.

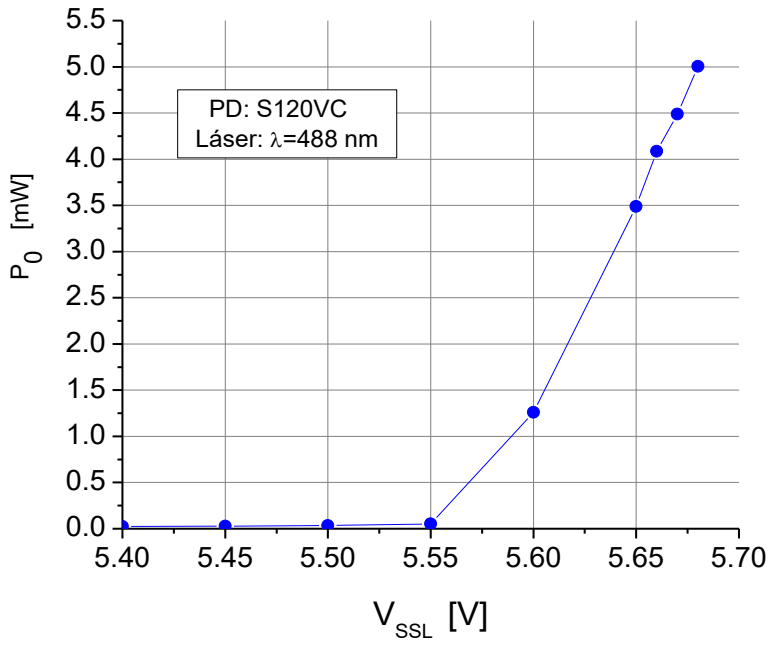


Figura 3.9. Potencia óptica medida del láser de estado sólido 488 nm utilizando el fotodetector S120VC.

Para los diodos láser de **980 y 655 nm** se observa inicialmente una región donde la potencia óptica emitida permanece cercana a cero, seguida de un incremento de la potencia al aumentar la corriente. Para el diodo láser de **980 nm**, la emisión aumenta a partir de aproximadamente 12 mA y alcanza una potencia cercana a 5 mW para una corriente de 27 mA. Por otra parte, para el diodo láser de **655 nm** se observa un incremento significativo de la potencia para corrientes superiores a aproximadamente 55–60 mA, alcanzando aproximadamente 5 mW a 70 mA.

Para el láser de estado sólido con emisión a **488 nm**, la potencia óptica permanece cercana a cero hasta un voltaje de alimentación aproximado de 5.55 V. Posteriormente, se observa un incremento de la potencia con el voltaje aplicado, alcanzando aproximadamente 5 mW a 5.68 V.

A partir de estos resultados se seleccionaron diferentes niveles de alimentación para obtener potencias ópticas en el intervalo de 0–5 mW, utilizadas posteriormente para caracterizar el sistema de detección empleando basado en el **fotodiodo SM05PD1A**.

3.3.2 Evaluación experimental de la respuesta en voltaje del sistema de detección con el Fotodiodo SM05PD1A para 488, 655 y 980nm.

Una vez medida la potencia óptica de las fuentes ópticas utilizadas, se evaluó la respuesta en voltaje del circuito integrado al **fotodiodo SM05PD1A** para las longitudes de onda de **488, 655 y 980 nm**. Para cada valor de potencia óptica medido previamente con el fotodetector comercial S120VC, se calculó el voltaje esperado $\mathbf{V_L}$ considerando la responsividad del fotodiodo $\Re$ y la resistencia de carga $\mathbf{R_L}$ correspondiente a cada longitud de onda. Estos valores fueron comparados con las mediciones realizadas mediante un multímetro y con los valores adquiridos por la tarjeta Arduino.

En la **Figura 3.10** se muestra el voltaje $\mathbf{V_L}$ en función de la potencia óptica incidente $\mathbf{P_{opt}}$ para **λ=980 nm**. Se observa un incremento lineal del voltaje conforme aumenta la potencia óptica desde 0 hasta 5 mW. Asimismo, las mediciones realizadas con el multímetro y los valores obtenidos mediante Arduino presentan una tendencia similar a los valores calculados, observándose pequeñas variaciones entre las tres curvas dentro del intervalo de potencia evaluado.

La **Figura 3.11** muestra los resultados obtenidos para **λ=488 nm**. En este caso, también se observa un incremento del voltaje con la potencia óptica incidente. Sin embargo, las diferencias entre los valores calculados y los obtenidos experimentalmente son más evidentes que para 655 y 980 nm, principalmente para los valores intermedios y superiores de potencia. A pesar de estas variaciones, las mediciones realizadas mediante el multímetro y Arduino presentan valores similares entre sí y siguen la misma tendencia con el incremento de la potencia óptica.

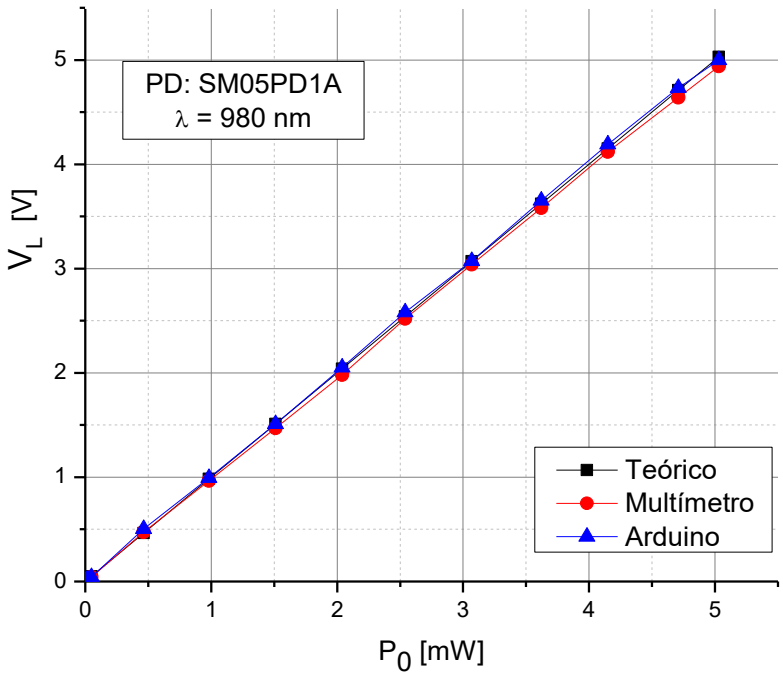


Figura 3.10. Voltaje de salida V_L registrado en función de la potencia óptica incidente de un diodo láser a λ=980 nm.

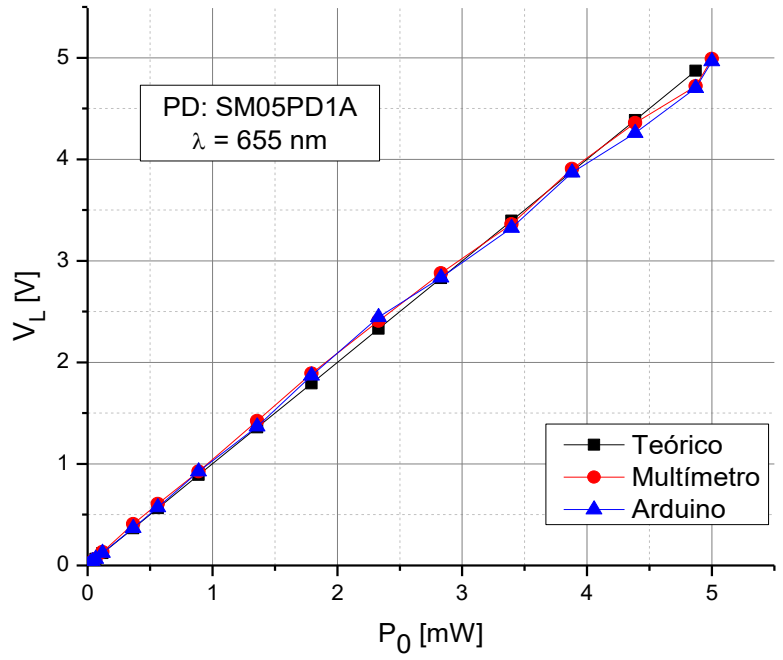


Figura 3.11. Voltaje de salida V_L registrado en función de la potencia óptica incidente para λ=655 nm.

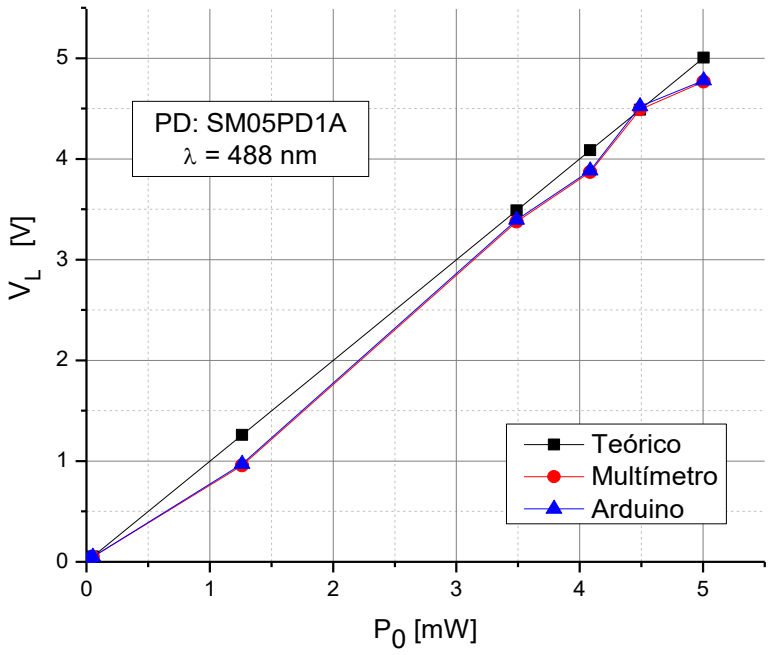


Figura 3.12. Voltaje de salida $\mathbf{V_L}$ registrado en función de la potencia óptica incidente para λ=488 nm.

Los resultados muestran una correspondencia entre el comportamiento teórico y las mediciones experimentales para las tres longitudes de onda evaluadas. Particularmente, para 655 y 980 nm se observa una mayor proximidad entre los valores calculados y los registrados experimentalmente. Por otra parte, las mediciones obtenidas mediante el multímetro y Arduino indican que la tarjeta de adquisición lee la variación de voltaje generada por el circuito integrado al fotodiodo dentro de los intervalos establecidos.

3.3.3 Mediciones de la potencia óptica empleando el sistema de detección propuesto: CI + PD-SM05PD1A + Arduino/Interfaz LabVIEW

Hasta este punto, se midieron las potencias ópticas de las fuentes de luz visibles utilizando el detector calibrado S120VC de la marca THORLABS y se evaluó la respuesta en voltaje del circuito integrado al fotodiodo SM05PD1A.

Ahora se procedió a realizar mediciones utilizando el sistema de detección desarrollado en este trabajo, conformado por el circuito integrado **(CI) del fotodiodo SM05PD1A** y la interfaz de adquisición basada en **LabVIEW/Arduino**. Para ello se muestra el arreglo experimental en la fotografía de la **Figura 3.13.**

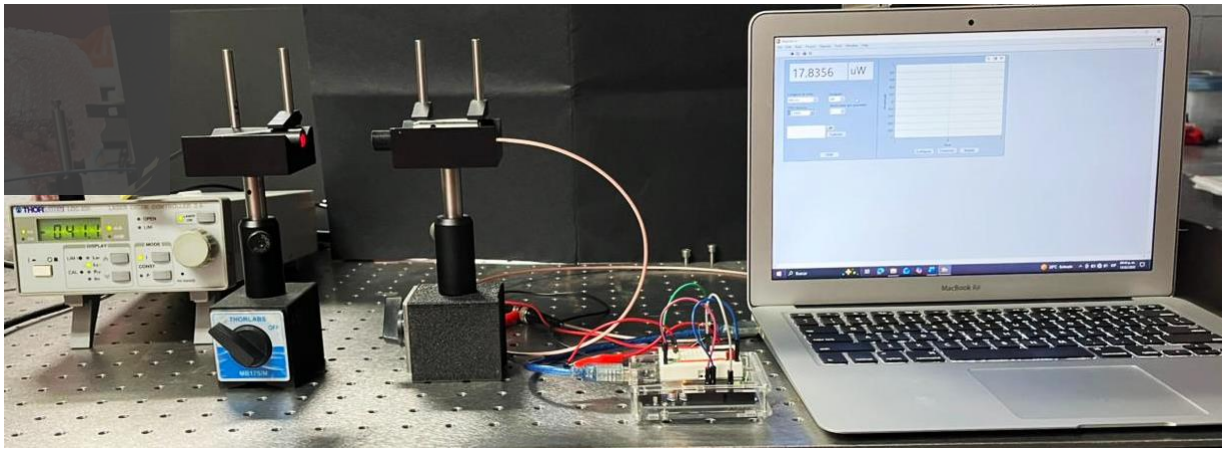


Figura 3.13. Fotografía del arreglo experimental implementado para las mediciones de potencia utilizando el CI+detector SM05PD1A, el Arduino y la interfaz gráfica en LabVIEW.

Los datos fueron procesados y visualizados en tiempo real mediante la interfaz desarrollada en LabVIEW. Las mediciones obtenidas con el sistema propuesto fueron comparadas con los valores de potencia registrados previamente mediante el fotodetector comercial S120VC.

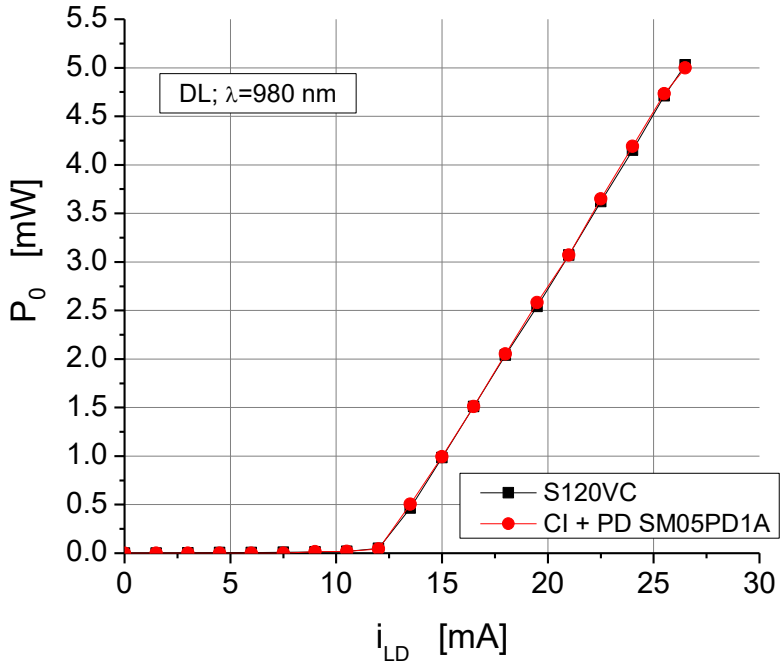


Figura 3.14. Potencia óptica medida del láser a 980 nm. Comparación de la respuesta del sistema de detección propuesto y el detector modelo S120VC.

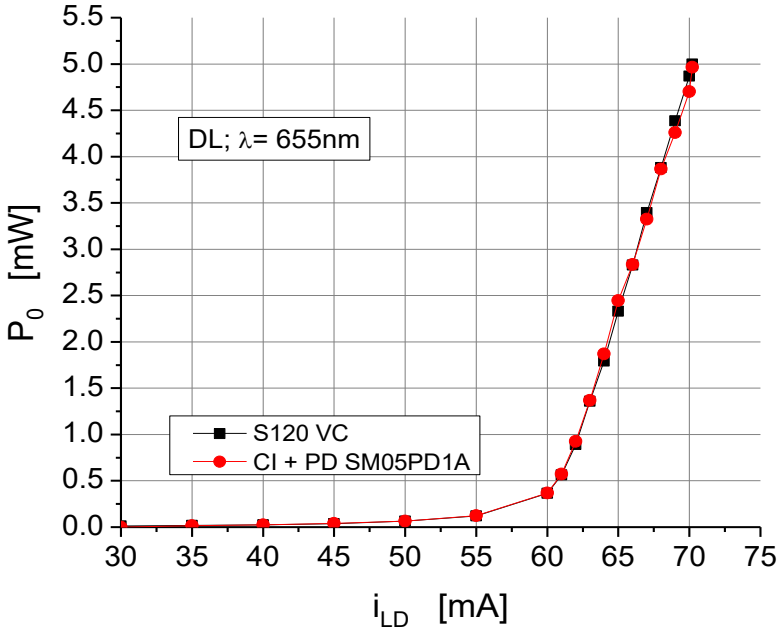


Figura 3.15. Potencia óptica medida del láser a 655 nm. Comparación de la respuesta del sistema de detección propuesto y el detector modelo S120VC.

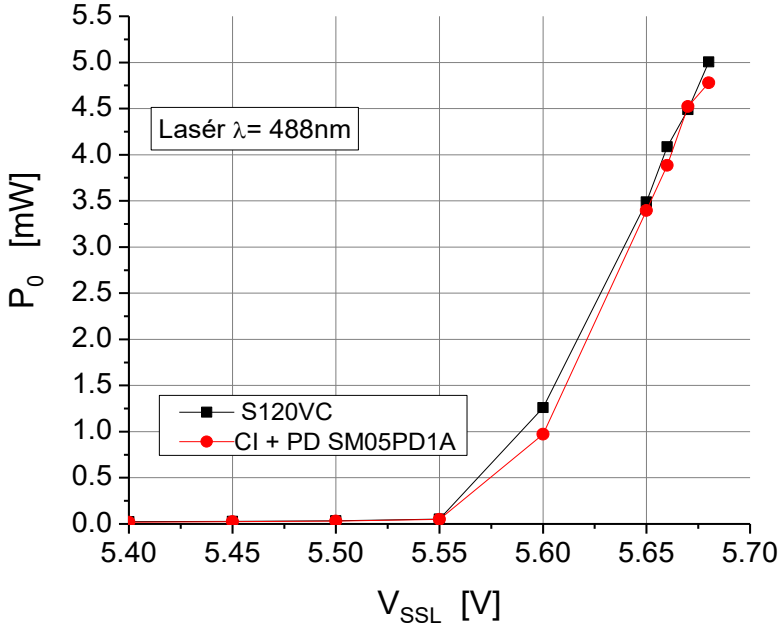


Figura 3.16. Potencia óptica medida del láser a 488 nm. Comparación de la respuesta del sistema de detección propuesto y el detector modelo S120VC.

En la **Figura 3.14** se observa que la potencia medida utilizando el sistema de detección propuesto presenta un comportamiento similar a la registrada con el fotodetector S120VC en todo el intervalo de corriente evaluado. Para corrientes superiores a aproximadamente 12 mA, la potencia aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor cercano a 5 mW para 27 mA. Las curvas correspondientes a ambos sistemas presentan valores próximos entre sí en el intervalo de potencia analizado. En la **Figura 3.15** se observa igualmente una correspondencia entre las mediciones realizadas con el S120VC y las obtenidas mediante el sistema propuesto, alcanzando una potencia cercana a 5 mW para una corriente de aproximadamente 70 mA.

Finalmente, en la **Figura 3.16** en comparación con los resultados obtenidos a 655 y 980 nm, para 488 nm se observa una mayor diferencia entre las mediciones realizadas con ambos detectores, principalmente para potencias superiores a aproximadamente 1 mW. No obstante, el sistema basado en el SM05PD1A reproduce la tendencia de la potencia óptica registrada mediante el detector comercial.

3.4 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN EN EL INFRARROJO (NIR)

3.4.1 Mediciones de potencia óptica con el CI+PD LSIPD-L1-B-0

Para evaluar la respuesta del sistema de detección en la región del infrarrojo cercano, se utilizó la fuente DHL-2000-BAL a las longitudes de onda de 980, 1310 y 1550 nm. La potencia óptica fue medida mediante el sistema desarrollado y comparada con los valores obtenidos utilizando el medidor comercial DXP-40D.

En la **Tabla 3.4** se presentan los valores de potencia óptica obtenidos mediante ambos sistemas. Asimismo, se determinó el error relativo de las mediciones realizadas con el sistema desarrollado, tomando como referencia los valores registrados mediante el DXP-40D.

En la **Figura 3.17** se muestra la comparación de la potencia óptica obtenida mediante ambos sistemas para las tres longitudes de onda evaluadas.

Longitud de onda [nm]	MedPotOpt: DXP-40D [µW]	CI+PD LSIPD-L1-B-0 [µW]	Error relativo [%]
980	9.57	8.61	10.03
1310	8.79	7.098	19.25
1550	6.16	6.70	8.77

Tabla 3.4. Comparación de la potencia óptica medida con: el medidor de potencia óptica modelo DXP-40D, el sistema de detección propuesto CI+PD LSIPD-L1-B-0, y el error relativo obtenido para las longitudes de onda de 980, 1310 y 1550 nm.

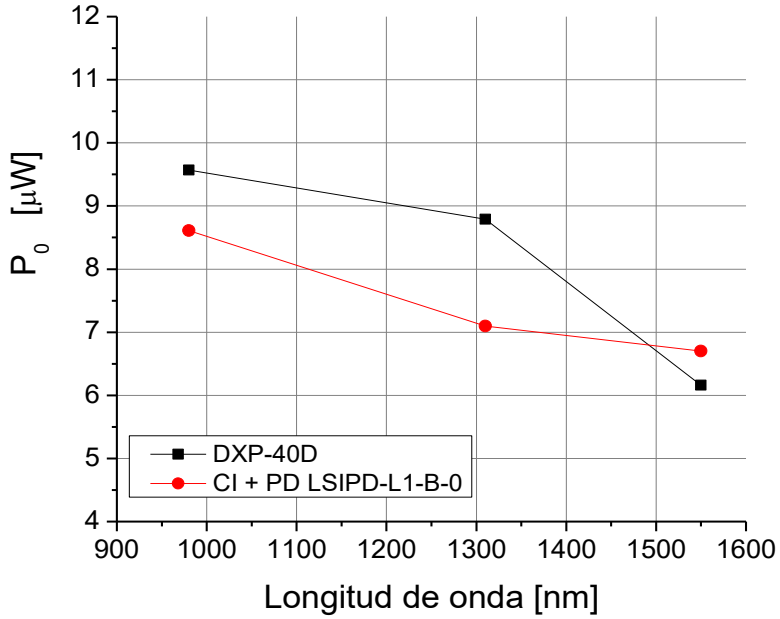


Figura 3.17. Comparación de la potencia óptica de la fuente DHL-2000-BAL medida con el detector DXP-40D y el sistema de detección CI+PD LSIPD-L1-B-0 para longitudes de onda de 980, 1310 y 1550 nm.

El sistema de detección basado en el CI+PD LSIPD-L1-B-0 presenta respuesta para las tres longitudes de onda evaluadas y permite obtener valores de potencia óptica del mismo orden de magnitud que los registrados mediante el medidor comercial DXP-40D. Los errores relativos obtenidos se encuentran entre 8.77 y 19.25 %, observándose la mayor diferencia a 1310 nm y la menor a 1550 nm.

3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA ADELGAZADA

3.5.1 Caracterización geométrica

Se fabricaron tres fibras ópticas adelgazadas mediante la técnica de calentamiento-estirado descrita en el Capítulo 2. Las microestructuras obtenidas fueron caracterizadas geométricamente con la finalidad de determinar el diámetro de cintura y las dimensiones de las diferentes regiones que conforman cada TFO. Los perfiles geométricos obtenidos se utilizaron para identificar las características de las microestructuras empleadas posteriormente en las pruebas de sensado.

En la **Tabla 3.5** se presentan las principales dimensiones obtenidas para los tres TFO fabricados. Para facilitar su identificación durante el análisis de los resultados, las microestructuras se denominaron Taper #1, Taper #2 y Taper #3. El Taper #1 fue utilizado posteriormente para las mediciones en la región visible, mientras que los Taper #2 y #3 fueron empleados para las mediciones en la región del infrarrojo cercano.

TFO	Longitud Transición 1 [mm]	Longitud Cintura [mm]	Longitud Transición 2 [mm]	Diámetro de cintura [µm]
Taper #1	10	9.5	9.5	30
Taper #2	10.5	5	10	30
Taper #3	10.5	9.5	9	30

Tabla 3.5. Dimensiones obtenidas de las fibras ópticas adelgazadas fabricadas.

En las **Figuras 3.18–3.20** se muestran los perfiles geométricos correspondientes a las tres microestructuras. Los perfiles permiten observar la reducción progresiva del diámetro de la fibra desde el diámetro original de la fibra hasta alcanzar la región de cintura, así como las regiones de transición generadas durante el proceso de calentamiento-estirado.

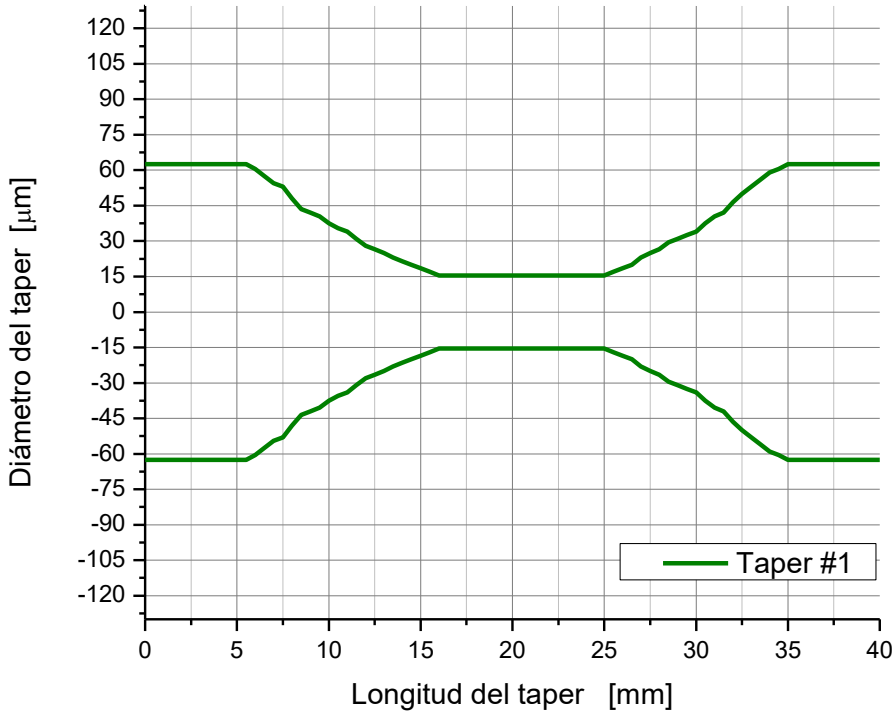


Figura 3.18. Perfil geométrico del Taper #1 utilizado para las mediciones en la región visible.

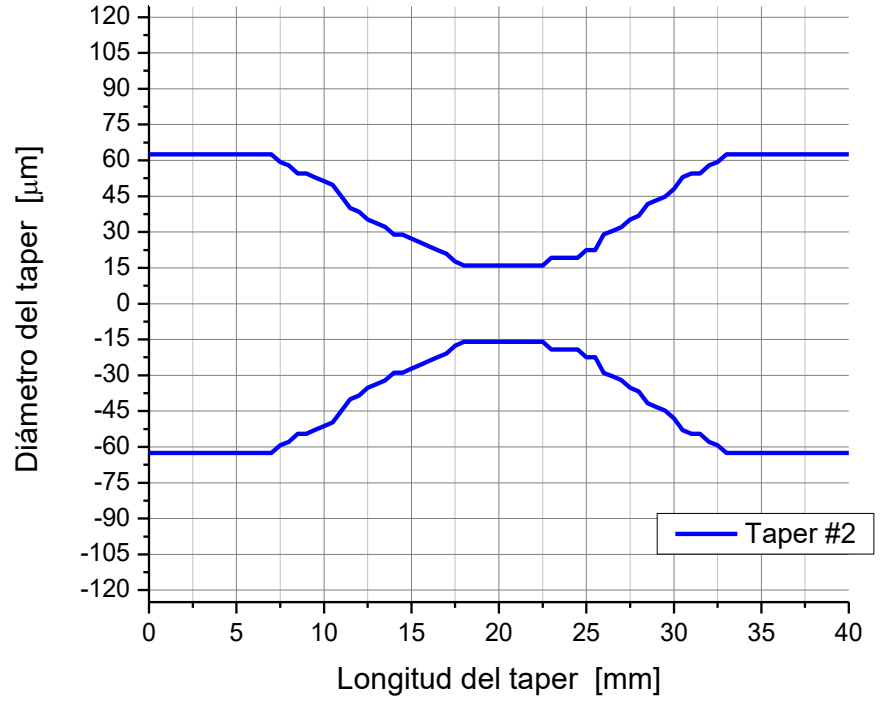


Figura 3.19. Grafica perfil geométrico del Taper #2 utilizado para las mediciones en la región NIR.

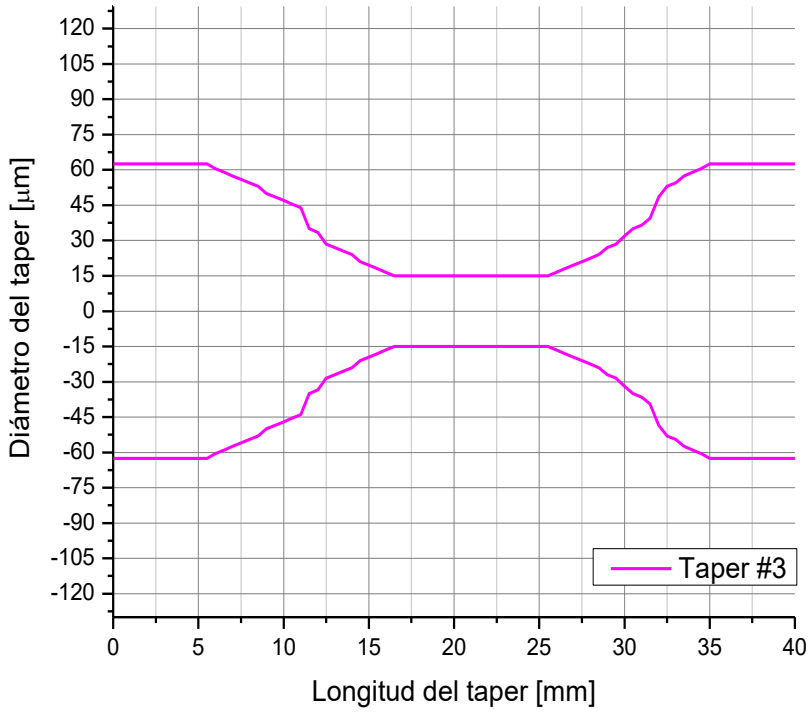


Figura 3.20. Grafica perfil geométrico del Taper #3 utilizado para las mediciones en la región NIR.

A partir de la caracterización geométrica se observa que el proceso de fabricación permitió obtener un diámetro de cintura de 30 µm para las tres microestructuras.

3.5.2 Respuesta espectral

Una vez realizada la caracterización geométrica de las fibras ópticas adelgazadas, se evaluó su respuesta espectral con la finalidad de analizar los cambios producidos en la señal óptica.

La respuesta espectral de cada microestructura se realizó en la región correspondiente a la aplicación para la cual sería utilizada posteriormente. De esta manera, el Taper #1 fue caracterizado en la región visible, debido a que fue empleado posteriormente en las pruebas de sensado con soluciones que tienen cambios en la región visible, mientras que los Tapers #2 y #3 fueron caracterizados en la región del infrarrojo cercano (NIR), para su posterior utilización en las pruebas con soluciones que presentan cambios en esta región. En cada caso, los espectros obtenidos fueron comparados con la respuesta de la fibra óptica multimodo (FOM) sin adelgazar utilizada como referencia.

En la **Figura 3.21** se muestra la respuesta espectral correspondiente al Taper #1 en el intervalo de 400 a 1100 nm. A pesar de la atenuación observada, el perfil espectral mantiene una distribución similar a la señal de referencia dentro del intervalo analizado.

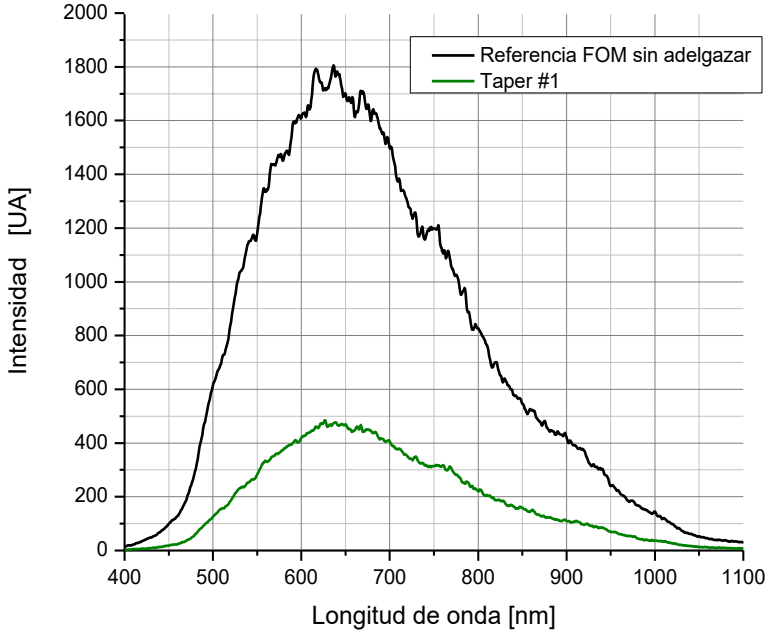


Figura 3.21. Respuesta espectral en la región visible del Taper #1 comparada con la fibra óptica multimodo (FMM) sin adelgazar.

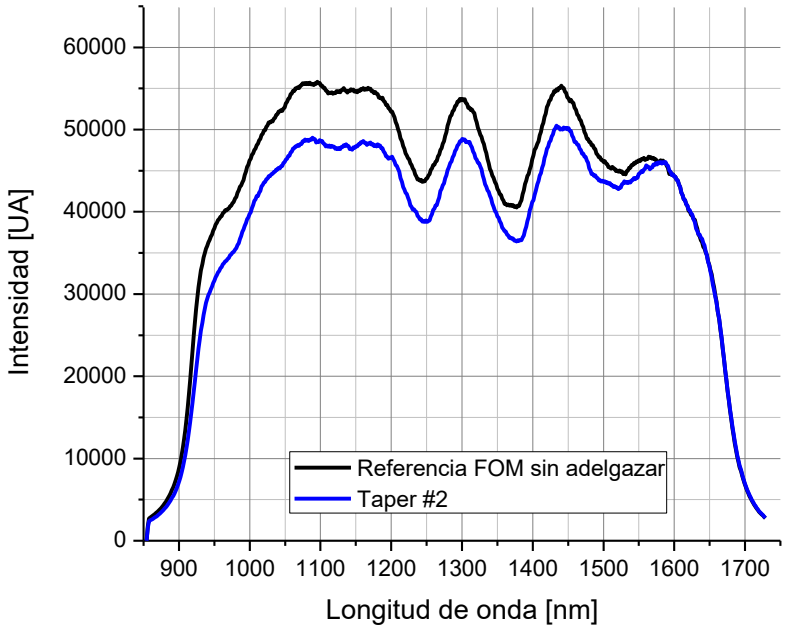


Figura 3.22. Respuesta espectral en la región NIR del Taper #2 comparada con la fibra óptica multimodo (FMM) sin adelgazar.

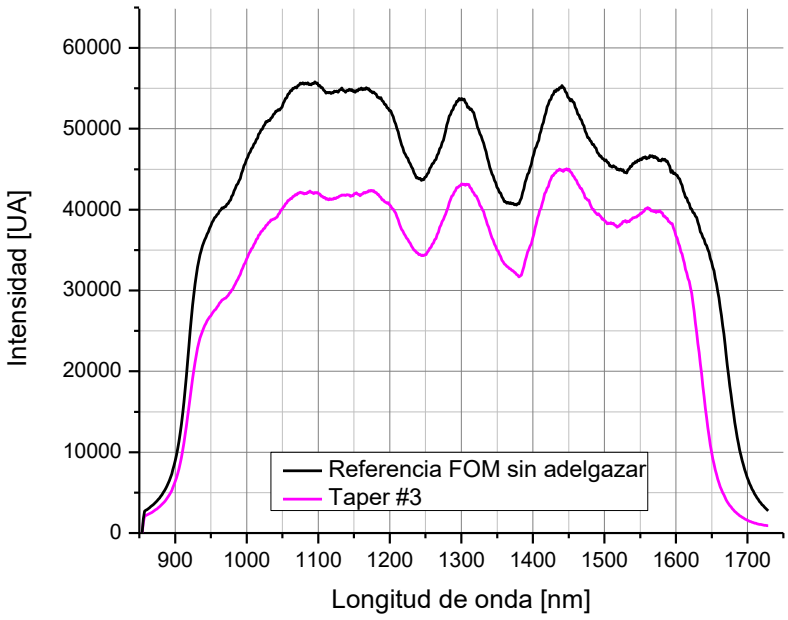


Figura 3.23. Respuesta espectral en la región NIR del Taper #3 comparada con la fibra óptica multimodo (FMM) sin adelgazar.

Por otra parte, en las **Figuras 3.22 y 3.23** se presentan las respuestas espectrales de los Tapers #2 y #3, respectivamente, caracterizados en la región NIR.

Las gráficas de la respuesta espectral muestran que el proceso de adelgazamiento produce una disminución de la intensidad óptica transmitida en las tres microestructuras. Sin embargo, se mantiene una señal óptica en la misma forma con diferente intensidad en las regiones espectrales seleccionadas para cada TFO. Estos resultados permitieron establecer las condiciones espectrales de operación de las microestructuras antes de su incorporación en las pruebas de sensado con las diferentes soluciones.

3.6 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN EN UN SENSOR DE FIBRA ÓPTICA ADELGAZADA

Una vez caracterizados el sistema de detección y las microestructuras de fibra óptica adelgazada, se realizó la integración de ambos elementos para implementar un sensor de fibra óptica. En esta configuración, el TFO actúa como elemento transductor, mientras que el sistema de detección desarrollado permite visualizar las variaciones de la señal óptica producidas por los cambios en el medio externo.

Para evaluar la respuesta del sensor se utilizaron soluciones con diferentes concentraciones de jamaica, glucosa y sacarosa. Como se describió en el Capítulo 2, para cada solución se determinó inicialmente el índice de refracción y posteriormente se analizó la respuesta óptica.

De acuerdo con las regiones espectrales establecidas previamente, el Taper #1 fue utilizado para las mediciones con soluciones de jamaica en la región visible, mientras que los Tapers #2 y #3 fueron empleados para las mediciones con glucosa y sacarosa, respectivamente, en la región del infrarrojo cercano. Finalmente, la respuesta de los sensores fue adquirida mediante el sistema de detección desarrollado basado en los circuitos integrados a los fotodiodos, la tarjeta Arduino y la interfaz implementada en LabVIEW.

3.6.1 Sensor de fibra óptica para soluciones de jamaica

Para evaluar el funcionamiento del sensor de fibra óptica adelgazada en la región visible se utilizaron diferentes muestras acuosas de **jamaica**. Para estas mediciones se empleó el **Taper #1**, cuya geometría y respuesta espectral fueron caracterizadas previamente. Debido a que las muestras fueron obtenidas utilizando diferentes relaciones entre la cantidad de jamaica, el volumen de agua destilada y el tiempo de extracción, la respuesta del sensor fue analizada en función del índice de refracción medido experimentalmente para cada muestra, en lugar de establecer una concentración porcentual.

- **Índice de refracción de las soluciones**

Para obtener diferentes valores de índice de refracción se prepararon tres muestras acuosas de jamaica bajo diferentes condiciones. En la **Tabla 3.6** se presentan la relación entre la cantidad de jamaica y el volumen de agua destilada, el tiempo de extracción y el índice de refracción obtenido para cada condición experimental.

Muestra	Preparación	Tiempo de extracción [h]	Índice de refracción
1	200 g de jamaica / 500 mL de agua destilada	0	1.3400
2	200 g de jamaica / 500 mL de agua destilada	1	1.3424
3	200 g de jamaica / 500 mL de agua destilada	12	1.3513
4	50 g de jamaica / 150 mL de agua destilada	72	1.3582
5	100 g de jamaica / 100 mL de agua destilada	72	1.3677

Tabla 3.6. Condiciones de preparación e índices de refracción de las muestras acuosas de **jamaica**.

De esta manera, las diferentes condiciones de preparación permitieron obtener índices de refracción comprendidos entre 1.3400 y 1.3677, los cuales fueron utilizados para evaluar la respuesta óptica del sensor.

- **Respuesta espectral del sistema sensor utilizando el Taper #1 para la detección de solucione acuosas de jamaica**

En la **Figura 3.24** se presentan los espectros obtenidos con el **Taper #1** para las diferentes muestras de **jamaica**. Como condiciones de referencia se consideraron inicialmente la respuesta del TFO expuesto al aire y posteriormente en contacto con agua. El análisis se realizó en la región visible, correspondiente al intervalo espectral seleccionado previamente para la aplicación del Taper #1.

Para observar con mayor claridad este comportamiento, los espectros fueron normalizados respecto a la señal obtenida con el TFO expuesto al aire. En la **Figura 3.25** se muestra la respuesta normalizada en el intervalo comprendido entre 500 y 700 nm. La señal correspondiente al agua presenta valores cercanos a la referencia, mientras que las muestras de jamaica muestran una disminución progresiva de la transmisión conforme aumenta el índice de refracción.

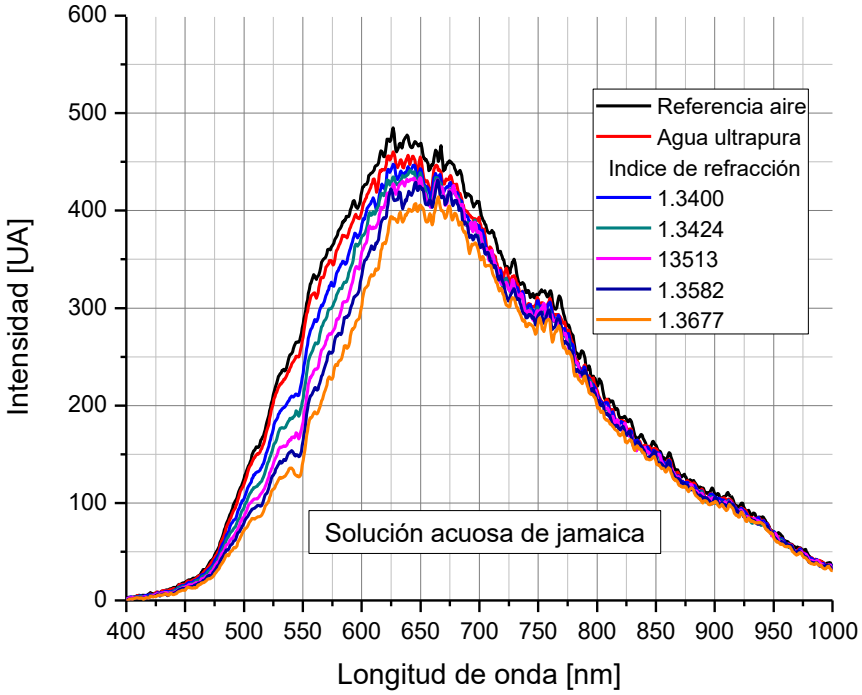


Figura 3.24. Respuesta espectral del sistema sensor óptico utilizando el Taper #1 para diferentes índices de refracción de las soluciones acuosas de Jamaica.

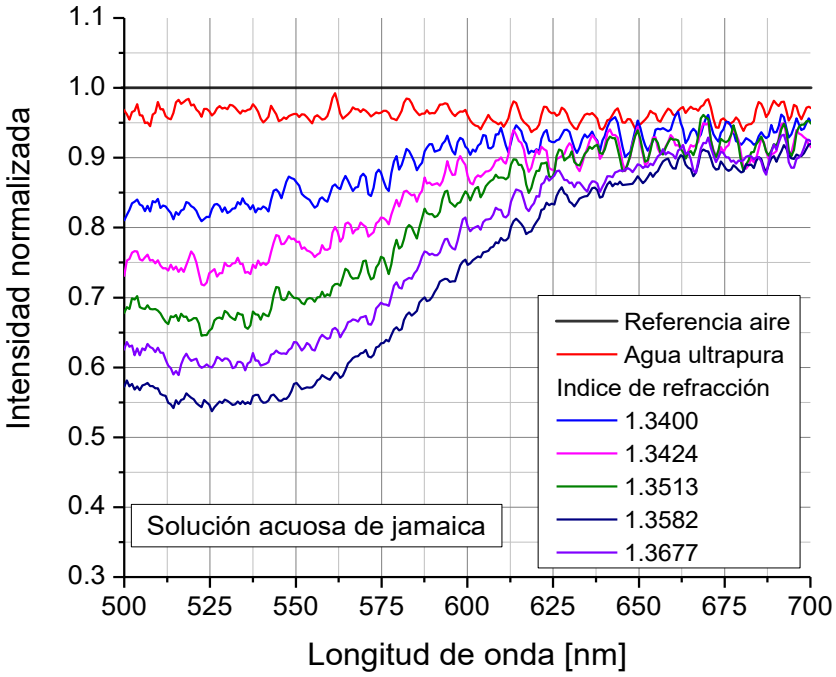


Figura 3.25. Respuesta espectral normalizada del sistema sensor óptico con el Taper #1 para diferentes índices de refracción de las soluciones acuosas de Jamaica. Referencia de normalización aire.

Las variaciones en el índice de refracción del medio circundante producen cambios en la intensidad óptica transmitida por el Taper #1. A partir de este comportamiento se seleccionaron diferentes longitudes de onda dentro de la región visible para evaluar la respuesta mediante mediciones puntuales de potencia óptica para los diferentes índices de refracción.

- **Respuesta óptica del sistema sensor propuesto y desarrollado: CI+PD-SM05PD1A+Taper #1 +Arduino/Interfaz LabView**

A partir de los cambios observados en la respuesta espectral del Taper #1, se seleccionaron las longitudes de onda de 525, 532, 575 y 600 nm para evaluar la respuesta del sensor mediante el sistema de detección desarrollado. Para estas mediciones se utilizó el CI+PD SM05PD1A, mientras que la señal adquirida mediante la tarjeta Arduino fue procesada en la interfaz desarrollada en LabVIEW para determinar la potencia óptica transmitida.

En la **Figura 3.26** se presenta la potencia óptica obtenida en función del índice de refracción de las muestras de jamaica para las cuatro longitudes de onda seleccionadas. Se observa una disminución de la potencia óptica conforme aumenta el índice de refracción.

Esta tendencia se presenta para todas las longitudes de onda evaluadas, aunque los valores absolutos de potencia dependen de la longitud de onda de operación.

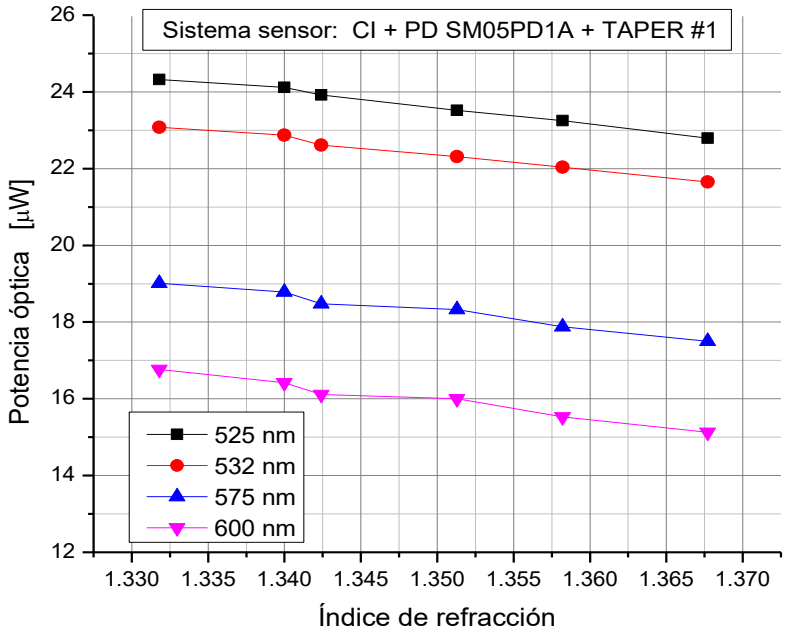


Figura 3.26. Potencia óptica medida con el sistema de detección CI+PD SM05PD1A + Taper #1 para diferentes índices de refracción de las soluciones acuosas de Jamaica considerando longitudes de onda de 525, 532, 575 y 600 nm.

Para 525 nm se registraron los mayores valores de potencia, observándose una disminución aproximada de 24.3 μW para la condición inicial en agua a 22.8 μW en la muestra con $n = 1.3677$. Para 532 nm se obtuvo un comportamiento similar, mientras que las mediciones realizadas a 575 y 600 nm presentaron valores menores de potencia, conservando en ambos casos una tendencia decreciente conforme aumentó el índice de refracción.

Estos resultados concuerdan con el comportamiento observado previamente en la respuesta espectral del Taper #1, donde el incremento del índice de refracción produjo una disminución de la intensidad óptica transmitida.

- ## Comparación de la respuesta óptica: S120VC vs CI+PD SM05PD1A

Con la finalidad de comparar la respuesta obtenida mediante el sistema de detección desarrollado, se realizaron mediciones bajo las mismas condiciones utilizando el fotodetector comercial **S120VC de Thorlabs**. Las mediciones se efectuaron para las longitudes de onda de 525, 532, 575 y 600 nm y para los mismos índices de refracción considerados con el sistema CI+PD SM05PD1A.

En la **Figura 3.27** se presentan los valores de potencia óptica registrados mediante el S120VC. Al igual que en el sistema desarrollado, se observa una disminución de la potencia óptica conforme aumenta el índice de refracción de las muestras. Para 525 nm, la potencia disminuye aproximadamente de 11.3 a 9.8 μW, mientras que a 532 nm disminuye aproximadamente de 11.2 a 9.7 μW. Para las longitudes de onda de 575 y 600 nm también se conserva una tendencia decreciente dentro del intervalo de índices de refracción evaluado.

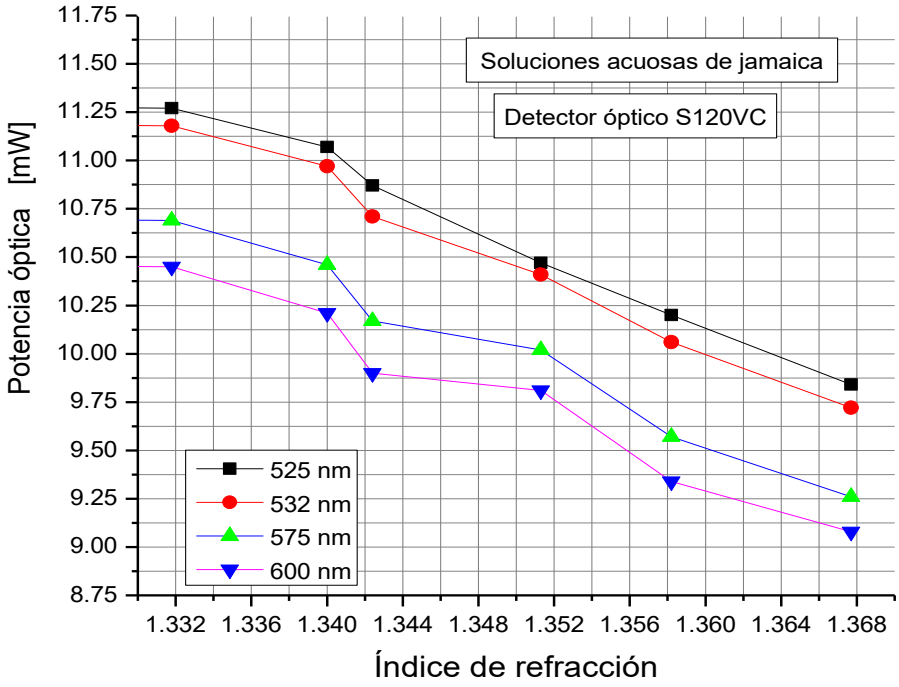


Figura 3.27. Potencia óptica medida con el fotodetector comercial S120VC de Thorlabs para diferentes índices de refracción de las soluciones acuosas de jamaica para las longitudes de onda de 525, 532, 575 y 600 nm.

Aunque existen diferencias entre los valores absolutos de potencia registrados por ambos sistemas, el sistema desarrollado y el fotodetector comercial S120VC reproducen la misma tendencia de disminución de la potencia óptica con el incremento del índice de refracción. Esto permite establecer una correspondencia entre la respuesta obtenida mediante el sistema CI+PD SM05PD1A y la registrada mediante el detector comercial.

3.6.2 Sensor de fibra óptica para soluciones de glucosa

Para evaluar la respuesta del sensor de fibra óptica adelgazada ante variaciones en el índice de refracción, se utilizaron **soluciones de glucosa** con concentraciones de 0, 25, 50, 75 y 100 % de glucosa. Donde 100 gr disueltos en 100 ml representaba la concentración máxima. Para estas mediciones se empleó el **Taper #2**, previamente caracterizado en la región del NIR. Inicialmente, se determinó el índice de refracción correspondiente a cada una de las soluciones y posteriormente se analizó la respuesta espectral del sensor y las variaciones de potencia óptica producidas por los cambios de concentración.

- **Índice de refracción de las soluciones**

En la **Tabla 3.7** se presentan los índices de refracción obtenidos para las diferentes concentraciones de glucosa. La concentración de 0 %, corresponde al agua ultrapura utilizada como referencia, se obtuvo un índice de refracción de 1.3320.

Glucosa Concentración (%)	Índice de refracción Medido, n
0	1.3320
25	1.3624
50	1.3879
75	1.4067
100	1.4209

Tabla 3.7. Índice de refracción de las soluciones acuosas de glucosa para diferentes concentraciones.

- **Respuesta espectral del sistema sensor utilizando el Taper #2 para la detección de solucione acuosas de glucosa**

En la **Figura 3.28** se muestran los espectros obtenidos mediante el **Taper #2** para las diferentes concentraciones de **glucosa**. Como condiciones de referencia se consideraron inicialmente el TFO expuesto al aire y posteriormente al agua ultrapura. Se observa que el incremento de la concentración produce una disminución progresiva de la intensidad óptica transmitida en prácticamente todo el intervalo espectral analizado.

La señal correspondiente al TFO expuesto al aire presenta los mayores valores de intensidad. Al colocar agua en contacto con la región adelgazada se observa una primera disminución de la señal y, posteriormente, al incrementar la concentración de glucosa de 25 a 100 %, la intensidad disminuye progresivamente. A pesar de esta reducción, se conservan las principales características del perfil espectral para las diferentes concentraciones evaluadas.

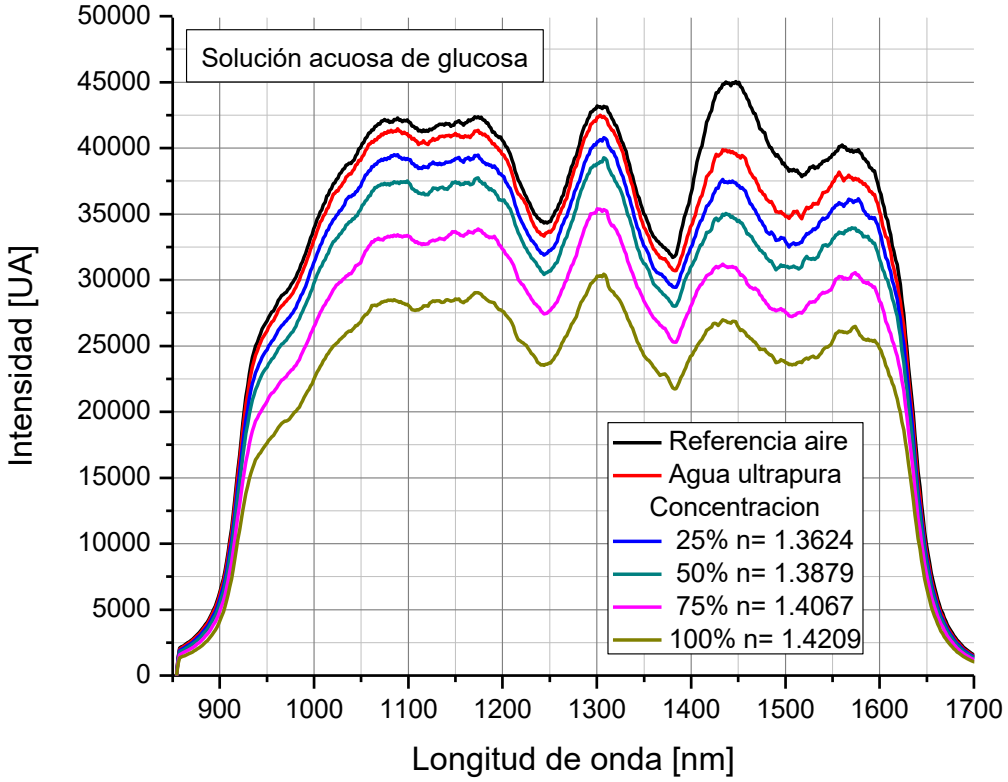


Figura 3.28. Respuesta espectral del sistema sensor óptico utilizando el Taper #2 para diferentes concentraciones de las soluciones acuosas de glucosa.

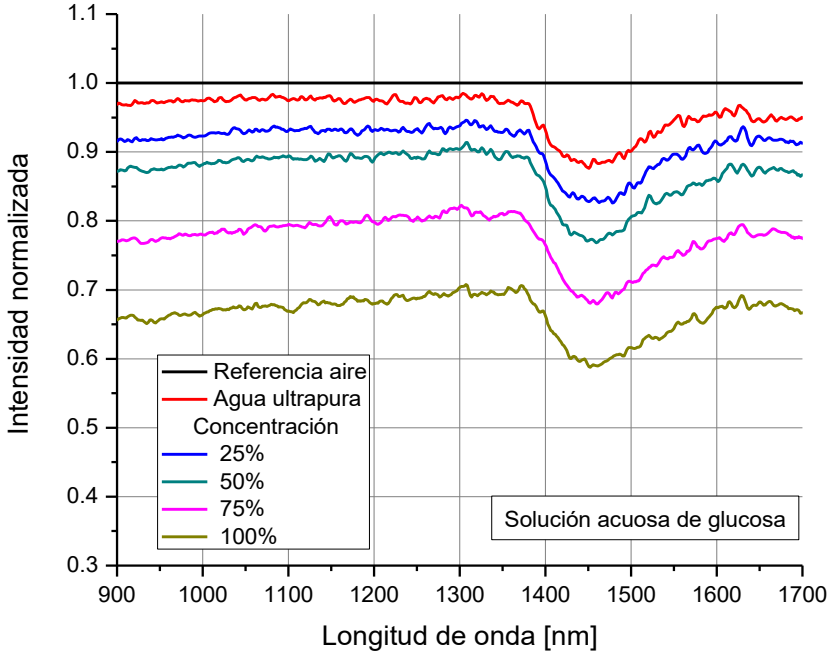


Figura 3.29. Respuesta espectral normalizada del sistema sensor óptico con el Taper #2 para diferentes concentraciones de soluciones acuosas de glucosa. Referencia de normalización aire.

Para observar con mayor claridad estos cambios, en la **Figura 3.29** se presentan los espectros normalizados respecto a la respuesta del TFO en aire. La separación entre las curvas aumenta conforme se incrementa la concentración de glucosa. Asimismo, se observa una región de mayor variación aproximadamente entre 1400 y 1550 nm, con un mínimo localizado alrededor de 1450 nm.

Los resultados muestran que el aumento en la concentración de glucosa y, consecuentemente, del índice de refracción, produce una disminución de la intensidad óptica transmitida por el TFO. La separación progresiva entre las respuestas correspondientes a las diferentes concentraciones permitió seleccionar longitudes de onda específicas para realizar las mediciones posteriores de potencia óptica.

- **Respuesta óptica del sistema sensor propuesto y desarrollado: CI+PD-YA302PD + Taper #2 +Arduino/Interfaz LabView**

A partir de los cambios observados en la respuesta espectral, se realizaron mediciones puntuales de potencia óptica para las diferentes concentraciones de glucosa. En la **Figura 3.30** se presentan los resultados obtenidos a las longitudes de onda de 1310, 1490 y 1550 nm mediante el CI al fotodiodo YA302PD, en conjunto con el sistema de detección diseñado.

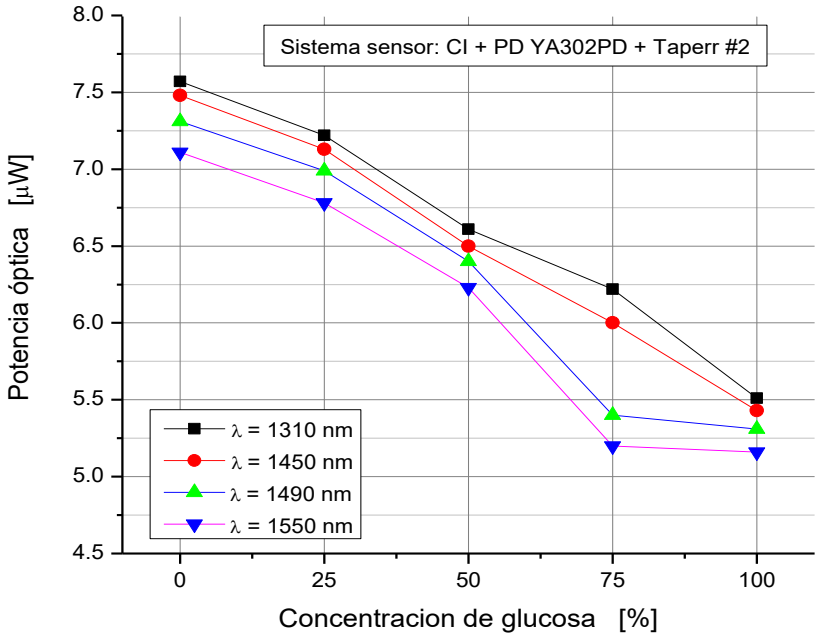


Figura 3.30. Potencia óptica medida con el sistema de detección CI+PD YA302PD + Taper #2 para diferentes concentraciones de glucosa para longitudes de onda de 1310, 1450, 1490 y 1550 nm.

- **Comparación de la respuesta óptica del sistema sensor: DXP-40D (detector comercial) vs CI+PD YA302PD (sistema detector propuesto)**

Con la finalidad de comparar la respuesta del sistema de detección desarrollado con un instrumento comercial, se realizaron mediciones de potencia óptica utilizando el medidor de potencia de fibra óptica DXP-40D. Debido a las longitudes de onda de operación disponibles en este instrumento, la comparación se realizó únicamente a 1310, 1490 y 1550 nm. Por esta razón, la medición realizada a 1450 nm con el sistema CI+PD YA302PD no fue considerada en la comparación.

Al comparar estos resultados con los obtenidos mediante el sistema CI+PD YA302PD, se observa que existen diferencias en los valores absolutos de potencia registrados por ambos sistemas. Sin embargo, los dos reproducen la misma tendencia de disminución de la potencia óptica conforme aumenta la concentración de glucosa para las longitudes de onda de 1310, 1490 y 1550 nm.

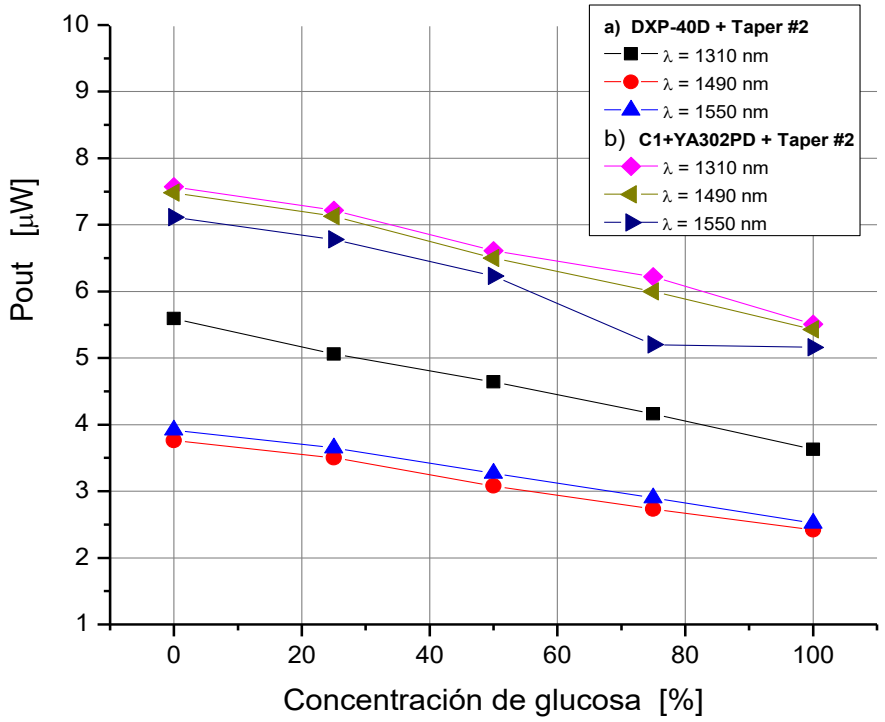


Figura 3.31. Comparación de la Respuesta óptica del sistema sensor: a) medida con el detector comercial DXP-40D y b) medida con el sistema de detección propuesto CI + PD YA302PD; utilizando el Taper #2 para diferentes concentraciones de glucosa para longitudes de onda de 1310, 1490 y 1550 nm.

3.6.3 Sensor de fibra óptica para soluciones de sacarosa

- **Índice de refracción de las soluciones**

Para evaluar la respuesta del sensor de fibra óptica adelgazada ante cambios en el índice de refracción en la región del espectro NIR, se prepararon **soluciones de sacarosa** con **concentraciones de 0, 25, 50, 75 y 100 %.** El **Taper #3** fue utilizado como elemento transductor para estas mediciones. Previamente, se determinó el índice de refracción correspondiente a cada una de las soluciones, cuyos valores se presentan en la **Tabla 3.8.**
Se observa un incremento del índice de refracción conforme aumenta la concentración de sacarosa. La concentración de 0 %, corresponde al agua ultrapura utilizada como referencia, se obtuvo un índice de refracción de 1.3320. Las mediciones de índice de refracción se hicieron una temperatura ambiente de 25°C aproximadamente.

Sacarosa Concentración (%)	Índice de refracción
0	1.3320
25	1.3649
50	1.3854
75	1.4037
100	1.4185

Tabla 3.8. Índice de refracción de las soluciones acuosas de sacarosa para diferentes concentraciones.

- **Respuesta espectral del sistema sensor utilizando el Taper #3 para la detección de solucione acuosas de sacarosa.**

En la **Figura 3.32** se muestran los espectros obtenidos con el **Taper #3** para las diferentes concentraciones de **sacarosa**. Como referencia se consideró inicialmente la respuesta del TFO expuesto al aire y posteriormente se realizaron las mediciones con agua ultrapura y con las soluciones de sacarosa a concentraciones de 25, 50, 75 y 100 %.

Se observa una disminución progresiva de la intensidad óptica transmitida conforme aumenta la concentración de sacarosa. Este comportamiento se presenta en gran parte del intervalo espectral analizado; sin embargo, las variaciones son más evidentes en la región comprendida aproximadamente entre 1400 y 1600 nm. Las principales características del espectro se conservan para las diferentes concentraciones, mientras que la intensidad disminuye al incrementarse el índice de refracción del medio externo.

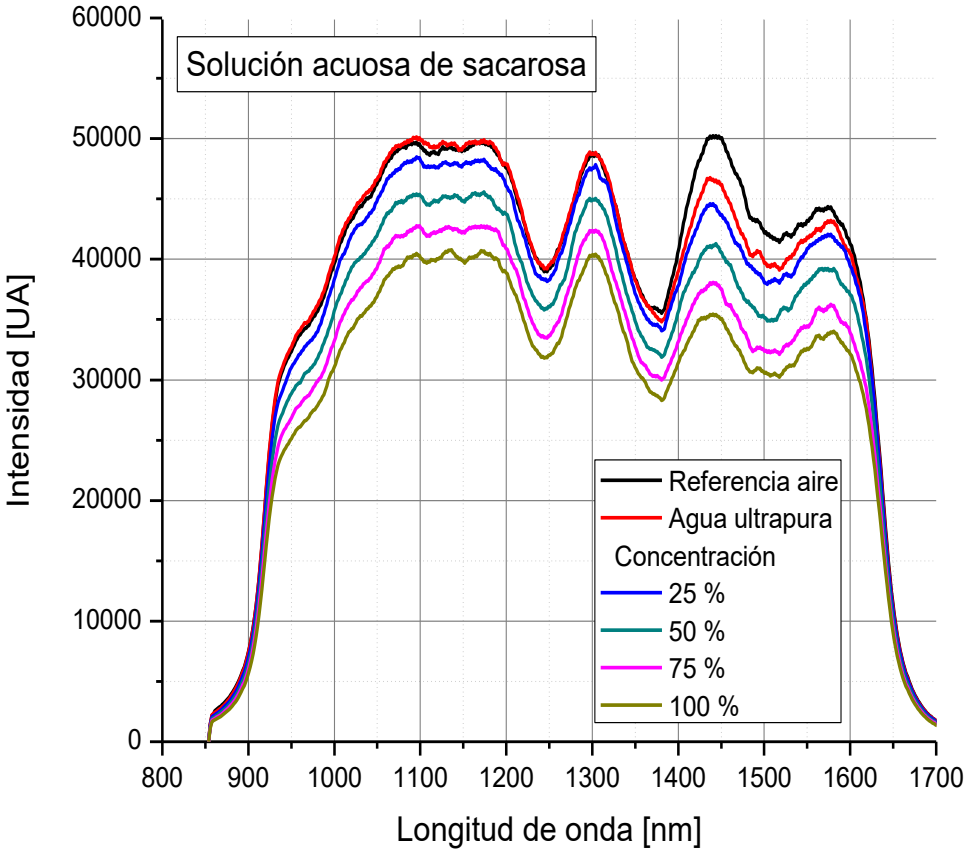


Figura 3.32. Respuesta espectral del sistema sensor óptico utilizando el Taper #3 para diferentes concentraciones de soluciones acuosas de sacarosa.

Para observar con mayor claridad los cambios producidos en esta región, los espectros fueron normalizados con respecto a la señal de referencia en aire. En la **Figura 3.33** se presenta la respuesta normalizada. La señal correspondiente al agua ultrapura presenta valores próximos a la referencia, mientras que el incremento de la concentración de sacarosa produce una disminución progresiva de la intensidad normalizada.

La mayor variación se observa alrededor de la región comprendida entre 1450 y 1500 nm. Para la solución con concentración de 100 %, la intensidad normalizada alcanza valores cercanos a 0.70 en esta región, mientras que para las concentraciones menores la disminución es progresivamente menor. Este comportamiento evidencia la modificación de la potencia óptica transmitida por el TFO al cambiar el índice de refracción del medio circundante.

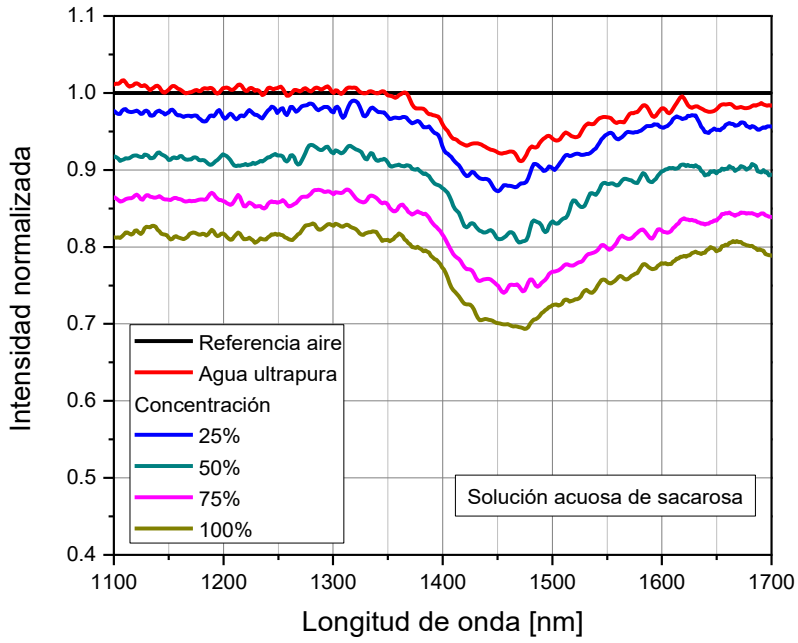


Figura 3.33. Respuesta espectral normalizada del sistema sensor óptico con el Taper #3 para diferentes concentraciones de sacarosa. Referencia de normalización aire.

- **Respuesta óptica del sistema sensor propuesto y desarrollado: CI+PD-YA302PD + Taper #3 +Arduino/Interfaz LabVIEW**

A partir de la respuesta espectral obtenida para las diferentes **concentraciones de sacarosa**, se seleccionaron las longitudes de onda de **1450 y 1550 nm** para evaluar la respuesta del sensor mediante el sistema de detección desarrollado. Para estas mediciones se utilizó el circuito integrado al **fotodiodo YA302PD**, y sistema de detección desarrollado para determinar la potencia óptica transmitida.

En la **Figura 3.34** se muestra la potencia óptica registrada mediante el **sistema CI+PD YA302PD** en función de la concentración de sacarosa para 1450 y 1550 nm. Para ambas longitudes de onda se observa una disminución de la potencia óptica conforme aumenta la concentración de la solución. A 1450 nm, la potencia disminuye de aproximadamente 3.67 µW para una concentración de 0 % hasta 2.98 µW para 100 %. De manera similar, para 1550 nm la potencia disminuye de aproximadamente 3.75 a 2.99 µW en el mismo intervalo de concentración. Para las concentraciones de 0 y 25 % se observa una diferencia entre las potencias registradas a 1450 y 1550 nm. Sin embargo, conforme aumenta la concentración, esta diferencia disminuye y las respuestas obtenidas para ambas longitudes de onda presentan valores similares. Este comportamiento concuerda con la disminución de intensidad observada previamente en la respuesta espectral del Taper #3 al incrementar la concentración de sacarosa.

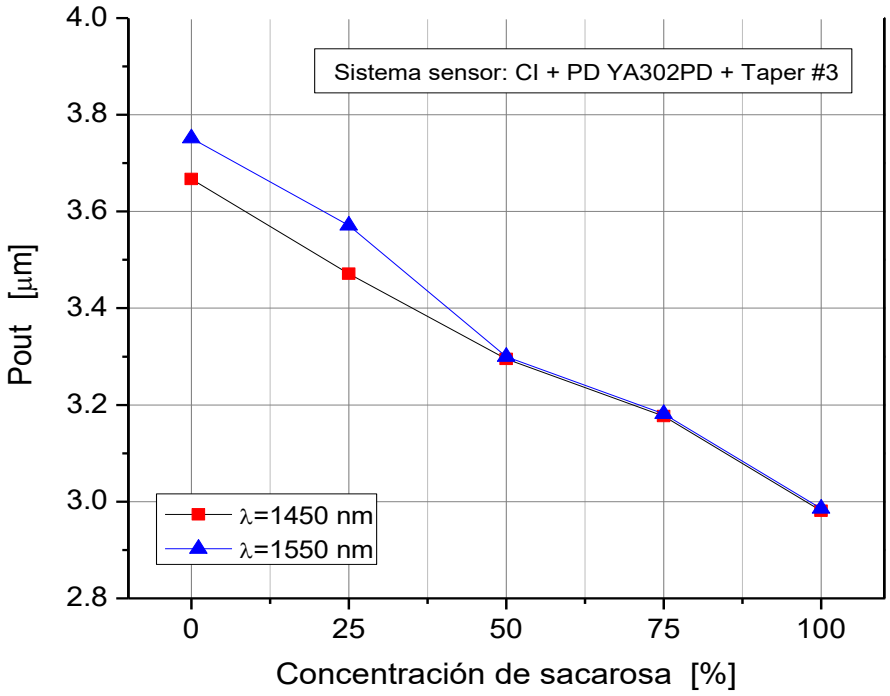


Figura 3.34. Potencia óptica medida con el sistema de detección CI+PD YA302PD + Taper #3 para diferentes concentraciones de sacarosa para longitudes de onda de 1450 y 1550 nm.

Comparación de la respuesta óptica a 1550 nm: DXP-40D (detector comercial) vs CI+PD YA302PD (sistema propuesto)

Con la finalidad de comparar la respuesta obtenida mediante el sistema desarrollado, se realizaron adicionalmente mediciones a 1550 nm utilizando un detector comercial modelo **DXP-40D**. En la **Figura 3.35** se presentan los valores de potencia óptica obtenidos mediante ambos sistemas para las diferentes concentraciones de sacarosa.

Se observa que los valores absolutos de potencia registrados mediante ambos detectores son diferentes; sin embargo, presentan la misma tendencia de disminución conforme aumenta la concentración. El sistema basado en el **CI+PD YA302PD** registró una disminución de aproximadamente 3.75 a 2.99 µW entre 0 y 100 % de concentración, mientras que el segundo sistema presentó igualmente una disminución progresiva en todo el intervalo evaluado.

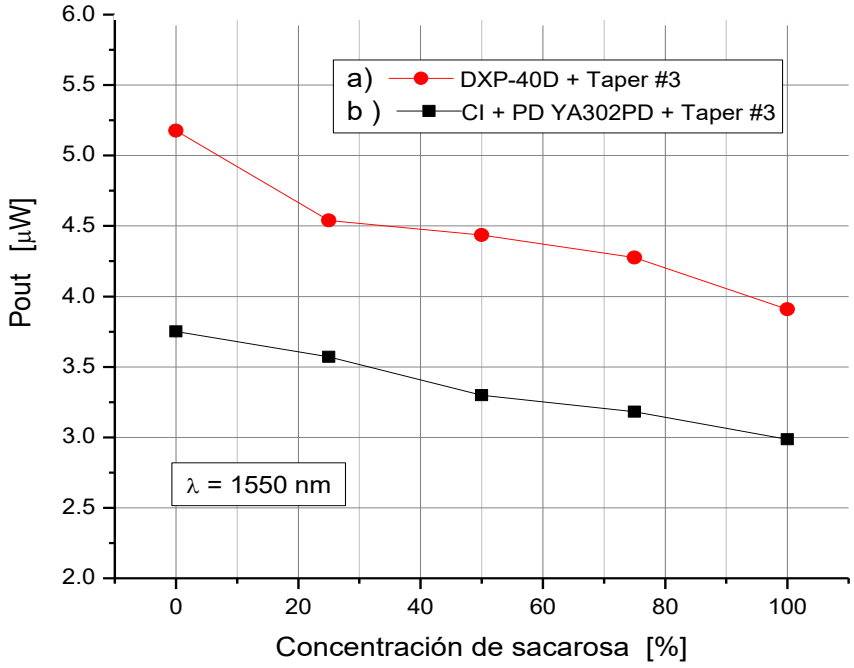


Figura 3.35. Comparación de la respuesta óptica del sistema sensor para a) medida con el detector comercial DXP-40D y b) medida con el sistema de detección propuesto CI + PD YA302PD; utilizando el Taper #3 para diferentes concentraciones de sacarosa a 1550 nm de longitud de onda.

CAPITULO 4: SUMARIO/CONCLUSIONES

- Se desarrolló un sistema detector óptico empleando fotodiodos comerciales, una tarjeta Arduino UNO y una interfaz gráfica programada en **LabVIEW**. El sistema permitió adquirir, procesar y visualizar en tiempo real la señal eléctrica generada por los fotodiodos como respuesta a la potencia óptica incidente.

- Se estudiaron y utilizaron **fotodiodos de Si e InGaAs** para cubrir la región visible (vis) e infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético. El fotodiodo de Si fue empleado para la detección en la región visible, mientras que los fotodiodos de InGaAs fueron evaluados en el infrarrojo cercano. La selección de los dispositivos de acuerdo con su respuesta espectral permitió adecuar el sistema detector a las longitudes de onda utilizadas durante las diferentes etapas experimentales.

- Se implementaron circuitos integrados a los fotodiodos los cuales operaron en configuración de polarización inversa. La señal de voltaje obtenida en la resistencia de carga fue adquirida mediante Arduino UNO y convertida en potencia óptica utilizando el valor de responsividad correspondiente a cada longitud de onda. De esta manera, el sistema desarrollado permitió relacionar la señal eléctrica adquirida con la potencia óptica detectada.

- Se desarrolló una interfaz gráfica en LabVIEW que permitió seleccionar la longitud de onda de operación, la responsividad del fotodiodo, elegir las unidades de medición y visualizar el comportamiento de la señal en función del tiempo. Estas características facilitaron la adquisición y el análisis de los datos, además de permitir la adaptación del sistema a diferentes fuentes ópticas y fotodiodos.

- Se caracterizó el funcionamiento del sistema detector en la región visible mediante fuentes ópticas con diferentes longitudes de onda. Los resultados mostraron variaciones en la señal detectada al modificar las condiciones de alimentación de las fuentes, lo que permitió comprobar la capacidad del sistema para registrar cambios en la potencia óptica incidente.

- En la región del infrarrojo cercano se evaluó el comportamiento de los fotodiodos de InGaAs en las longitudes de onda de interés. A partir de sus respuestas se seleccionó el dispositivo más adecuado para su incorporación al sensor de fibra óptica adelgazada. Esta evaluación permitió establecer las condiciones de operación del sistema detector para su aplicación posterior.

- Se fabricaron microestructuras de fibra óptica adelgazada mediante la técnica de calentamiento–estirado, utilizando un quemador oscilante como fuente de calor. El control de los parámetros de fabricación permitió reducir progresivamente el diámetro de la fibra y obtener TFO con diferentes dimensiones geométricas. De esta

forma, se cumplió el segundo objetivo específico relacionado con la fabricación de microestructuras sensoras basadas en FOA.

- La caracterización geométrica permitió determinar las longitudes de las transiciones, la longitud de la cintura y el diámetro final de cada TFO. Los perfiles obtenidos mostraron regiones de transición y cintura definidas, por lo que las microestructuras fabricadas presentaron características adecuadas para su estudio como elementos transductores.

- Se caracterizó la respuesta espectral de los TFO en las regiones correspondientes al uso previsto para cada microestructura. Los espectros obtenidos permitieron analizar las variaciones en la transmisión producidas por el proceso de adelgazamiento y seleccionar la fibra con las características geométricas y espectrales más apropiadas para su incorporación al sistema sensor.

- Se implementó un sistema sensor basado en fibra óptica adelgazada mediante la integración del TFO, el fotodiodo, el circuito de fotodetección, Arduino UNO y la interfaz gráfica de LabVIEW. Esta integración permitió adquirir y visualizar las variaciones de la potencia óptica transmitida a través de la microestructura, cumpliéndose el tercer objetivo específico.

- El funcionamiento del sistema sensor fue evaluado utilizando soluciones acuosas de sacarosa, glucosa y jamaica. En los tres casos se observaron variaciones en la potencia óptica transmitida a través de la fibra adelgazada cuando se modificó el índice de refracción del medio circundante. Sin embargo, cada conjunto de muestras presentó características particulares.

- En conjunto, las pruebas con sacarosa y glucosa demostraron la capacidad del sistema para detectar variaciones del índice de refracción en la región NIR, mientras que las pruebas con jamaica permitieron extender su evaluación a muestras cuya respuesta está en la región VIS.

- En conclusión: los resultados obtenidos permitieron cumplir el objetivo general de desarrollar un sistema detector óptico basado en LabVIEW y Arduino e incorporarlo a un sistema sensor de fibra óptica adelgazada. El sistema desarrollado constituye una alternativa de bajo costo, configurable y adaptable para la adquisición y visualización de señales provenientes de sensores ópticos. Su implementación representa una inversión aproximada de $750 MXN, en comparación con los costos de algunos fotodetectores comerciales, como los de Thorlabs, cuyo precio es de aproximadamente $6,978 MXN, y Newport, con un costo cercano a $36,000 MXN.

REFERENCIAS

[1] J. M. López-Higuera, Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, primera ed., New York: John Wiley & Sons, 2002.

[2] J. Castrellon-Uribe, «Optical Fiber Sensors: An Overview,» de *Fiber Optic Sensors*, InTech, 2012.

[3] D. Krohn, T. MacDougall y A. Mendez, Fiber Optic Sensors: Fundamentals, SPIE: USA, 2014.

[4] S. Yin, P. B. Ruffin y F. T. S. Yu, Fiber Optic Sensors, C. Press, Ed., 2017.

[5] G. Brambilla, «Optical fibre nanowires and microwires: a review,» *IOP Publishing Ltd,* vol. 12, nº 4, 17 Mayo 2010.

[6] S. Korposh, S. W. James, S.-W. Lee y R. P. Tatam, «Tapered Optical Fibre Sensors: Current Trends and Future Perspectives,» *Sensors,* vol. 19, nº 10, 2019.

[7] J. Love, W. Henry, W. Stewart, R. Black, S. Lacroix y F. Gonthier, «Tapered single-mode fibres and devices. Part 1: Adiabaticity criteria,» *IEE Proceedings J (Optoelectronics),* vol. 138, nº 5, 01 Octubre 1991.

[8] T. A. Birks y Y. W. Li, «The shape of fiber tapers,» *Journal of Lightwave Technology,* vol. 10, nº 4, 1992.

[9] N. Almtireen, Z. Ateh, M. Eltallaa, Y. Alhendawy, M. Ryalat y H. Elmoaqet, «Real Time Infrared Distance Sensor for Cyber Physical Systems Using Arduino-LabVIEW Integration,» *2025 International Conference on Communication, Computing, Networking, and Control in Cyber-Physical Systems (CCNCPS),* pp. 31-36, 2025.

[10] R. kenny, T. Birk y K. Oakley, «Control of optical fibre taper shape,» *Electronics Letters,* vol. 27, nº 18, 1991.

[11] J. Villatoro, M.-H. David y E. Mejía, «Fabrication and modeling of uniform-waist single-mode tapered optical fiber sensors,» *Appl. Opt.,* vol. 42, nº 13, 2003.

[12] M. d. C. Soto-Robles, «Fabricación y caracterización de fibras ópticas adelgazadas para aplicación en sensores ópticos,» 2023.

[13] J. d. R. Fernández, S. Shariat-Panahi, D. S. Gandul y A. M. Lázaro, LabVIEW Programación para sistemas de instrumentación, Garceta Grupo Editorial, 2011.

[14] L. G. C. Ramírez, G. S. A. Jiménez y J. M. Carreño, Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino, Larousse - Grupo Editorial Patria, 2014.

[15] J. S. Wilson, «CHAPTER 1 - Sensor Fundamentals,» de *Sensor Technology Handbook*, Newnes, 2005, pp. 1-20.

[16] M. J. McGrath y C. N. Scanaill, Sensor Technologies: Healthcare, Wellness and Environmental Applications., Apress, 2014.

[17] R. Dewhurst y G. Y. Tian, «Sensors and sensing systems,» *Measurement Science and Technology,* vol. 19, nº 2, p. 020101, 2008.

[18] J. Haus, Optical Sensors: Basics and Applications., WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, , 2010.

[19] A. S. Morris y R. Langari, «Sensor Technologies,» Elsevier, 2016, p. 375–405.

[20] J. M. López-Higuera, A. Cobo, O. M. Conde, M. Lomer, F. J. Madruga, M. A. Quintela y D. Gonzaléz, «Tecnologías de sensores fotónicos: técnicas y tendencias,» de *ÓPTICA PURA Y APLICADA*, Santander, Sociedad Española de Óptica, 2006, pp. 151-161.

[21] J. P.Clarkin, «Chapter 18: Tapered Fibers and Specialty Fiber Microcomponents,» de *Specialty Optical Fibers Handbook*, Academic Press, 2007, pp. 579-597.

[22] M. Ramírez, «Desarrollo, diseño e implementación de un prototipo estrechador de micro-fibra óptica,» León, Guanajuato, 2020.

[23] B. Wang y E. Mies, «Review of fabrication techniques for fused fiber components for fiber lasers,» *SPIE Proceedings,* 2009.

[24] S. Zhu, J.-w. Xing, F.-f. Pang y T.-y. Wang, «Temperature sensor based on a single-mode tapered optical fiber,» *Journal of Shanghai University (English Edition),* vol. 15, pp. 101-104, 2011.

[25] V. Berikashvili, A. A. Gordeev, A. P. Gorchakov y A. P. Zhilinskiy, «CO2-laser-fused biconical couplers,» *telecommunications & radio,* vol. 46, nº 1, pp. 13-15, 1991.

[26] A. Duduś, R. Blue, M. Zagnoni, G. Stewart y D. Uttamchandani, «Modeling and Characterization of an Electrowetting-Based Single-Mode Fiber Variable Optical

Attenuator,» *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,* vol. 21, nº 4, pp. 253-261, 2015.

[27] K. Zhang, P. Wu, J. Dong, D. Du, Z. Yang, C. Xu, H. Guan, H. Lu, W. Qiu, J. Yu y Z. Chen, «Broadband mode-selective couplers based on tapered side-polished fibers,» *Optics Express,* vol. 29, nº 13, pp. 19690-19702, 2021.

[28] H. J. Kbashi, «Fabrication of submicron-diameter and taper fibers,» *Journal of Materials Science & Technology,* vol. 28, nº 4, pp. 308-312, 2012.

[29] Y. H. Chuang, K. G. Sun, C. J. Wang, J. Y. Huang y C. L. Pan, «A simple chemical etching technique for reproducible fabrication of,» *Review of Scientific,* vol. 69, pp. 437-439, 1998.

[30] S. Harun, K. Lim, C. Tio, K. Dimyati y H. Ahmad, «Theoretical analysis and fabrication of conical fiber,» *Optik,* vol. 124, nº 6, pp. 538-543, 2013.

[31] R. Jarzebinska, S. Korposh, S. James, W. Batty, R. Tatam y S.-W. Lee, «Optical Gas Sensor Fabrication Based on Porphyrin-Anchored Electrostatic Self-Assembly onto Tapered Optical Fibers,» *Analytical Letters,* vol. 45, nº 10, pp. 1297-1309, 2012.

[32] B. E. A. Saleh y M. C. Teich, Fundamentals of photonics, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

[33] D. Sawyer y R. Rediker, «Narrow Base Germanium Photodiodes,» *Proceedings of the IRE,* vol. 46, nº 6, p. 1122–1130, 1958.

[34] Thorlabs, Inc., «Fotodiodos montados,» [En línea]. Available: https://www.thorlabs.com/mounted-photodiodes?tabName=Photodiode%20Tutorial. [Último acceso: 2024].

[35] A. S. Morris y R. Langari, «Data Acquisition with LabVIEW,» de *Measurement and Instrumentation*, 2012, p. 115–133.

[36] B. Ehsani, Data Acquisition Using LabVIEW, Packt, 2016.

[37] «aula21 | Formación para la Industria,» 08 Mayo 2023. [En línea]. Available: https://www.cursosaula21.com/arduino-todo-lo-que-necesitas-saber/.

[38] E. Julián, Manual de programación LabVIEW 9, Peru, 2018.

[39] D. Calinoiu, R. Ionel, M. Lascu y A. Cioabla, «Arduino and LabVIEW in educational remote monitoring applications,» *IEEE,* pp. 1-5, 2014.

[40] Y. Luo, C. G. Li, F. Zhang y K. Wang, «The real-time monitor system based on LabVIEW,» *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology, IEEE,* p. 848–851, 2011.

[41] R. Faleh, I. Zaatouri, S. Baabou y A. Kachouri, «Implementation of Air Pollution Supervision System Using LabVIEW,» *Signals & Devices,* p. 648–652, 2018.

[42] A. K. Rohit, A. Tomar, A. Kumar y S. Rangnekar, «Virtual lab based real-time data acquisition, measurement and monitoring platform for solar photovoltaic module,» *Resource-Efficient Technologies,* vol. 3, nº 4, p. 446–451, 2017.

[43] M. A. Hairuddin, N. D. K. Ashar, A. F. Z. Abidin y N. M. Tahir, «Cost-Effective Interfaces with Arduino-LabVIEW for an IOT-Based Remote Monitoring Application,» *IntechOpen,* 2021.

[44] J. Villatoro, D. Monzón-Hernández y D. Talavera, «High resolution refractive index sensing with cladded multimode tapered optical fibre,» *Electronics Letters,* vol. 40, nº 2, 2004.

[45] L. Niu, C.-L. Zhaon, H. Gong y S. J. Yi Li, «Curvature sensor based on two cascading abrupt-tapers modal,» *Optics Communications,* vol. 333, pp. 11-15, 2014.

[46] Y. Raji, H. Lin, S. Ibrahim, M. Mokhtar y Z. Yusoff, «Intensity-modulated abrupt tapered Fiber Mach-Zehnder Interferometer for the simultaneous sensing of temperature and curvature,» *Optics & Laser Technology,* vol. 86, pp. 8-13, 2016.

[47] X. Chen, K. Zhou, L. Zhang y I. Bennion, «Optical chemsensors utilizing long-period fiber gratings UV-inscribed in D-fiber with enhanced sensitivity through cladding etching,» *IEEE Photonics Technology Letters,* vol. 16.

[48] L. Benye, J. Lan, W. Sumei y C. Qianghua, «A new Mach-Zehnder interferometer in a thinned-cladding fiber fabricated by electric arc for high sensitivity refractive index sensing,» *Optics and Lasers in Engineering,* vol. 50, nº 6, p. 829–832, 2012.

[49] ARDUINO, 2026. [En línea]. Available: https://www.arduino.cc/hardware#classic-family. [Último acceso: 14 10 2026].

Cuernavaca, Morelos, a 03 de noviembre de 2026.

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
COORDINADOR DEL POSGRADO
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: **Sistemas sensores basados en fibras ópticas adelgazadas incorporando programación gráfica** que presenta la alumna **María del Carmen Soto Robles**, para obtener el título de la **Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.**

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO.**

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ
DR. ULISES LEÓN SILVA
DR. ROMEO EMMANUEL NÚÑEZ GÓMEZ
DR. JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO
DR. J. JESÚS CASTRELLÓN URIBE

Se adiciona efirma UAEM

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

ULISES LEON SILVA | Fecha:2026-11-04 20:42:16 | FIRMANTE

xq4IPuuinV3sSxBnAyuIrG6ZwFXN++9MtHj0jIfacOtEx8o4XaO7oqzkKa6QvHhbcQg2Dci2DzfL1pamnWoam8Rszw7R3x4gbn7pbd6RXcRVl/LE2KZ2nA8L/qoItF/N5n5RQOu4qvFlHyYqLg+ElGfwSxQahSW/ze7kp76Q9bc8C6ncmpzOaHLeFw3pLi1aY12vEJMH8o+VD964L7TSrX4SlVdrZKKYAQ5Te5bcE4JHt8X5qG6jCi2FENY18DGvK3UyE64fcgwUukHjywprTyI6ZS8Bf6g8Y3LStS2YNu9+/xGQ+S4RU+aiJ0gpV3zovcAgbt6eeAGBgu7DFiU/vA==

J. JESUS CASTRELLON URIBE | Fecha:2026-11-05 09:17:53 | FIRMANTE

d4kqf64bMqlPRrbCxniH0TGVMZKjaXvGKbIQ/2NSNzUSMg6yVBPqHp5dYGR/Rgx05VRTDxc7EQKW8j9CMbiMru4BFJOdaBaalT22xytvOLrfDuhjjC2zTvD5/BGsdkdhPdWsBGS9LSZ5Vz6vIKBYvvlCh7uc02dsynutRK+Xzz4IkX4sRRs8r2q61OaMw18GbaOJ81UaMHRExPTEWnGUkyljwCwMuLjuW3eT8Od/HiR9iVjjDfw8qEhH89pxcl8hYBz++GFfhKm+RF9/gWLz5QUQoGaFvRprYfekzqCbCPswoxgSRU33UVszqJt0LQhTZn5uni3DIFnr3eDp4caZqA==

JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ | Fecha:2026-11-05 09:56:43 | FIRMANTE

Y/XEON9BsUXULwh47utP2jEqwh3x3jot9bTZuvXkMvN/xQVIHi/30X5uMUz+aU1CzqdWt2lO2AcUNIxWYOeup+hVxaQ/pE4d4bjj4t/+tFHX35DU9BbLjmZfQ0Cb+/tzAOHTGI2rrWH4JlN3ZseQoFf8RBILWSoX2eODiVY5dBP5w4rv3dz9wDW9LIzoYS+AwGRbZRb0sKb/CsGSgdTGcyxHQDBRk42XtlkE7G+D2toJWk68rvvA/N7g1NiiEk+Skaw6PvZDd/v4grXpdBBsrFxyY1PlvlYRtAVNWfzOL+LM1ma00/ADmLT6/9Ak8F5sKL6oMsotVdROBJW3o4ZoAA==

ROMEO EMMANUEL NUÑEZ GOMEZ | Fecha:2026-11-05 12:17:44 | FIRMANTE

FzC5NhhKh0tvZBWOXF0HCXRSHwf3yN49PkEMe+pvbEQ7emQpfC3sFXiO3hqxFvgwZcM1X9Gcu8mxQ6VYGaUEyo430i7viXC7ZvnMy6qR498iw5wfsl20PIdyNJTTIxCdUnZvx9j5FWGCGTlWE39I8XRKhtDuW0WBT2EdGtnrn4xqnTnRi6LyUa5kJkCQW26P52rBJpeVjniN11K84SvQ0EEEyXVsPpZ9UORS7A1wtu7zMUAwZi3IU99Tyqp8GnnTPGFRhLeeGCeGgCKigivO44TIlCsxq0NLBTcuKFuQ8T47BrH3jlkb0EAnvFQr0xeFE4u9Ady5bT3Sw4XAHgciJw==

JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO | Fecha:2026-11-06 08:58:20 | FIRMANTE

bk4XNJ8YZVUehO4RP5pgyWOrTlovF4dNqoeYxuRkU3CSWs24hxBAwjiCH7ztnUUmptL/7+h6AhdLVM91MOfUeBkgmNq00YjI4aCfkE+SznozKQ/L9DqH3nAsrJplY/UgX4SdVSeNHgKG8RlERZPzq13kewMRsHTHKfDiwUkQmnI4Q0K9xrV1yjMI9DkLbVvCMBjHVf5nGho9BB8YKXaB7yf+R9oJOM4giLSOUZ7LLp3kB4LI4ibgoVQTgzDNoaasuRKAPeJSjqjKGm7QBMkII7fUwz2IUydxsDXU7cjcT7YAFX7QESrzqC5DbWpIIWgnprdx+yqqUlkKtjUcuc+AGQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

UyFdR2TnE

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/vJvzxOeJTvbpA4Y1LnpdvzHJ27HsQXDt