

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

SENSOR DE NIVEL ÓPTICO TIPO FLOTADOR

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

PRESENTA:

GARCÍA DÍAZ FRANCISCO JAVIER

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL

SINODALES:

DR. DARWIN MAYORGA CRUZ

DR. JOSÉ ANTONIO MÁRBAN SALGADO

DR. JONNY PAUL ZAVALA DE PAZ

CUERNAVACA, MORELOS

FEBRERO, 2018

RESUMEN

Se realizó un sensor de nivel óptico tipo flotador utilizando fibras ópticas como el medio de la señal de transmisión y recepción. El uso de sensores ópticos nos permite trabajar en condiciones corrosivas y explosivas, son inmunes a los efectos de interferencia electromagnética en comparación al uso de sensores eléctricos y electrónicos. Es importante mencionar que el sensor óptico propuesto no ha sido reportado dentro de la literatura y tampoco se encuentra dentro de la industria; así que se propone el diseño e implementación de un sensor óptico de nivel.

Una parte principal del sensor, es el uso de una superficie reflectora, así que son realizados varios modelos de trazos de rayos en superficies cóncavas y planas en Solidworks, con el fin de conocer los trayectos de los rayos incidentes y reflejados. Al obtener algunos modelos, se llevó cabo el diseño de las piezas del cuerpo del sensor en Solidworks y se imprimieron en la impresora 3D modelo MINIFAB 3D y así corroborar el funcionamiento del prototipo.

En el caso de los elementos ópticos utilizados, la fibra óptica de plástico, tiene un diámetro en el núcleo más grande en comparación de las fibras monomodo y multimodo, lo que permite que sea mayor la cantidad de luz que se transporten en ellas. El diodo láser y fotodiodo, operan a una longitud de 650 nm. También dos lentes, esférica y cilíndrica, son usados en las pruebas del sensor, lo que permiten confinar la mayor cantidad de luz.

El sensor óptico de nivel tiene ventaja sobre los demás ya que trabaja en un campo de valores, pues muchos operan de la forma ON-OFF (Todo o nada) mientras el sensor propuesto trabaja en un campo de medida de valores que corresponde de 3.75 V a 142 mV en 35.08° a una sensibilidad de 0.1353 mm/mV en una tarjeta de adquisición de 10 bits de resolución o si se desea una sensibilidad más pequeña es usada una tarjeta de 16 bits que

corresponde a 0.087a79 mm/mV. Considerando que si tiene un brazo (vástago) que hace contacto con el líquido (flotador) a una distancia de 1 m, se tendría una altura de operación de 80.6 cm. Así que de acuerdo a tal brazo, se puede ajustar la altura de medición a la necesidad que uno requiere implementar el sensor de nivel. Además que es un sensor que puede trabajar en depósitos cerrados o abiertos y ambientes inflamables.

ABSTRACT

A float type optical level sensor was made using optical fibers as the medium of the transmission and reception signal. The use of optical sensors allows us to work in corrosive and explosive conditions; they are immune to the effects of electromagnetic interference compared to the use of electrical and electronic sensors. It is important to mention that the proposed optical sensor has not been reported within the literature and is not within the industry either; that the design and implementation of an optical level sensor is proposed.

A main part of the sensor is the use of a reflecting surface, so several ray tracing models are made on concave and flat surfaces in Solidworks, in order to know the paths of the incident and reflected rays. When obtaining some models, the design of the body parts of the sensor was carried out in Solidworks and printed on the 3D printer model MINIFAB 3D and thus corroborate the operation of the prototype.

In the case of the optical elements used, the plastic fiber optic has a larger core diameter compared to singlemode and multimode fibers, which allows a greater amount of light to be transported in them. The laser diode and photodiode operate at a length of 650 nm. Also two lenses, spherical and cylindrical, are used in sensor tests, which allow confining the greatest amount of light.

The optical level sensor has an advantage over others since it works in a field of values, so many operate in the ON/OFF mode (Everything or Nothing) while the sensor option works in a field of measurement of the values corresponding to 3.75 V-142 mV in 35.08° with a sensitivity of 0.1353 mm/mV on a DAQ of 10-bit or if you want a smaller sensitivity is a DAQ of 16-bit corresponding to 0.08779 mm/mV. Considering that if you have an arm (shank) that makes contact with the liquid (float) at a distance of 1 m, you would have an operating height of 80.6 cm. So according to such arm, you can adjust the measurement height to the need one needs to implement the level sensor. In addition, it is a sensor that can work in closed or open tanks and flammable environments.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a CONACYT por el apoyo económico durante los dos años de los estudios de maestría. Además del Proyecto de Investigación Ciencia Básica-CONACyT Referencia 169197 que brindó el apoyo para el material del proyecto de la tesis.

También quiero agradecer a mi asesor Dr. Miguel Ángel Basurto por el tiempo, apoyo, conocimiento y observaciones en el desarrollo de mi tesis, por lo cual estaré muy agradecido con él. Asimismo al Dr. Omar Palillero por ser mi coasesor y brindar consejos, apoyo y contribuir en la tesis, además de formar parte de las evaluaciones tutorales de cada semestre, que gracias a sus observaciones de cada presentación, eso me ayudaba a mejorar cada vez más mi desempeño al exponer mi tesis. De igual modo, agradecer al Dr. Darwin Mayorga que formo parte del comité tutorial y de haber tenido la oportunidad de cursar una asignatura bajo su tutela, la cual me permitió conocer más sobre el desarrollo de mi tesis. También del mismo modo, al Dr. José Márban que tuve la oportunidad de cursar una asignatura impartida por él, que me brindó las bases fundamentales de mi tesis y de contar con su participación en la defensa de mi tesis.

Por último agradecer a mis compañeros de clase que me apoyaron en el transcurso de la maestría, Noé, Luisa, Julián, Josué y Ulises y también a los compañeros de laboratorio Pablo, Héctor, Alan y Mireya por los consejos y apoyo en esta etapa académica.

ÍNDICE

Resumen	I
Abstract.....	II
Agradecimientos	IV
Lista de Tablas.....	X
Lista de Figuras	XI
CAPÍTULO 1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación	1
1.3 Hipótesis	2
1.4 Objetivos	2
1.5 Resultados esperados	2
CAPÍTULO 2 Estado del arte	3
2.1 Clasificación general de los sensores de nivel.....	3
2.2 Campo de investigación de los sensores de nivel	12
CAPÍTULO 3 Marco teórico	27
3.1 Óptica	27
3.2 Espejos	31
3.2.1 Espejos planos.....	31

3.2.2 Espejos esféricos.....	33
3.2.3 Espejo cóncavo.....	33
3.2.4 Espejo convexo.....	33
3.2.5 Formación de imágenes en espejos	34
3.2.6 Visualización de imágenes en diferentes situaciones en un espejo cóncavo	35
3.2.7 Visualización de imagen en situación de un espejo convexo.....	37
3.3 Lentes	38
3.3.1 Lente convergente	41
3.3.2 Lente divergente	41
3.3.3 Lente cilíndrica.....	41
3.4 Fibras ópticas.....	43
3.4.1 Estructura básica de la fibra óptica	43
3.4.2 Propagación de la luz en la fibra óptica	44
3.4.3 Abertura numérica (AN)	46
3.4.4 Tipos de fibra óptica.....	48
3.4.5 Fibras multimodo con salto de índice.....	48
3.4.6 Fibras multimodo con índice gradual	49
3.4.7 Fibras monomodo	50

3.4.8 Fibras ópticas de plástico.....	51
3.4.9 Atenuación en la fibra óptica.....	52
3.5 Diodo láser.....	54
3.5.1 Propiedades de la emisión láser	56
3.6 Fotodetector.....	58
3.6.1 Características de los detectores de luz	59
3.6.2 Fotodiodo.....	60
3.6.3 Fotodiodo PIN.....	62
CAPÍTULO 4 Desarrollo experimental	64
4.1 Esquema del sistema de transmisión y recepción del sensor.....	64
4.2 Geometría del trazado de rayos.....	65
4.3 Selección de fibras ópticas	67
4.4 Elección del componente emisor	68
4.5 Pruebas y medición de emisión	70
4.6 Pruebas y medición con la fibra óptica	71
4.7 Pruebas y medición de recepción.....	73
4.8 Elección del componente detector.....	73
4.9 Pruebas y mediciones en la salida del fotodetector.....	74
4.10 Diseño del filtro	76

4.11 Pruebas y mediciones del detector con el filtro.....	77
4.12 Resultados preliminares de las mediciones.....	79
4.13 Diseño del prototipo del sensor de nivel.....	79
4.13.1 Prototipo 1.....	80
4.13.2 Prototipo 2.....	81
4.14 Medición del ángulo de inclinación del flotador.....	84
4.15 Implementación de la DAQ (Adquisición de datos).....	86
4.15.1 Uso del software de adquisición de datos.....	87
4.15.2 Ecuaciones del mecanismo de medición del nivel de líquido y programación.....	89
4.15.3 Programación en diagrama de bloques y pantalla para el usuario	92
CAPÍTULO 5 Resultados y discusión.....	94
5.1 Diseño del prototipo 1.....	94
5.2 Diseño del prototipo 2.....	95
5.3 Diseño del prototipo 3.1.....	97
5.4 Diseño del prototipo 3.2.....	100
5.5 Diseño del prototipo 4.....	102
5.6 Tabla comparativa de prototipos 2, 3.1, 3.2 y 4.....	104
5.7 Uso de la lente cilíndrica.....	105

5.8 Prototipo 5 modular.....	108
5.9 Tabla comparativa (con lente cilíndrica) en prototipos 4 y 5	110
5.10 Pruebas del prototipo con mejores condiciones de trabajo.....	111
5.11 Comparación del valor real respecto a la ecuación generada por el software Origin.....	112
5.12 Comparación de las Tarjetas de adquisición de datos (Arduino VS DAQ NI)	113
5.13 Discusión	115
5.13.1 Trazo de rayos de los prototipos diseñados.....	116
5.13.2 Tabla comparativa general de los prototipos	118
CAPÍTULO 6 Conclusiones y recomendaciones.....	126
6.1 Recomendaciones	129
Referencias.....	130

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Comparación de algunas características de las fibras de plástico y fibras de vidrio.....	68
Tabla 4.2 Resultados de voltajes y potencia en la salida del fotodiodo	79
Tabla 5.1. Comparación de características de prototipos 2, 3.1, 3.2 y 4	104
Tabla 5.2 Comparación de características de prototipos 4 y 5 con uso de lente cilíndrica	110
Tabla 5.3 Comparación de Tarjeta Arduino y DAQ NI	114
Tabla 5.4 Tabla comparativa final de los prototipos diseñados	119-125

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de clasificación de los sensores de nivel de líquidos. ...	4
Figura 2.2 Sensores de nivel en la industria	4
Figura 2.3 Sensores de sonda.....	5
Figura 2.4 Sensores de nivel de cristal.....	6
Figura 2.5 Sensores de flotador con mecanismo de flotador.....	7
Figura 2.6 Sensor de nivel manométrico	8
Figura 2.7 Sensor de membrana	8
Figura 2.8 Sensor de tipo burbujeo.....	9
Figura 2.9 Sensores de nivel conductivo	9
Figura 2.10 Sensores de nivel capacitivo.	10
Figura 2.11 Sensor ultrasónico	10
Figura 2.12 Sensor radar	11
Figura 2.13 Sensor de rayos gamma.....	11
Figura 2.14 Sensor de rayos gamma.....	12
Figura 2.15 Arreglo experimental del sensor de nivel de gasolina.....	13
Figura 2.16 Esquema experimental del sensor óptico.	13
Figura 2.17 a) Estructura básica de la viga con la fibra de rejilla de Bragg. b) Configuración experimental del sensor de nivel	14

Figura 2.18 a) Esquema del sensor basado en una fibra SMS. b) Diagrama del arreglo experimental	15
Figura 2.19 a) Construcción del sensor basado en pérdidas de curvatura. b) Esquema del funcionamiento del sensor	15
Figura 2.20 Diagrama y arreglo experimental del sensor	16
Figura 2.21 a) Diseño del sensor. b) Arreglo experimental.....	17
Figura 2.22 a) Diagrama esquemático del interferómetro. b) Imagen microscópica del taper	18
Figura 2.23 Diagrama esquemático de la configuración experimental.....	18
Figura 2.24 Diagrama de circuito del sensor de detección de nivel.....	19
Figura 2.25 Dibujo parcialmente ampliado de la cabeza del sensor. Diagrama esquemático del sensor de nivel propuesto.....	20
Figura 2.26 a) Esquema experimental del sensor de fibra óptica para medición del líquido. b) Esquema de conversión de nivel de líquido.....	20
Figura 2.27 Diagrama del sistema experimental (sensor de fibra óptica)	21
Figura 2.28 Arreglo experimenta del sensor de fibra óptica evanescente	22
Figura 2.29 Diseño de 2 sondas a) Tipo “cara más corta b) Tipo “hipotenus la cara”	23
Figura 2.30 Configuración experimental para la medición de tiempo de respuesta de la sonda.....	23
Figura 2.31 Arreglo del diseño de la sonda de fibra óptica de plástico	24
Figura 2.32 Arreglo experimental del sensor de fibra óptica de plástico.....	24

Figura 2.33 Esquema general del medidor continuo de nivel de líquido.....	25
Figura 2.34 Principios de operación a) el sensor en el aire b) el sensor en el líquido	25
Figura 2.35 Sistema del sensor de nivel de líquido.....	26
Figura 2.36 a) Molde de latón utilizado para crear las ranuras de la fibra b) Esquema de una ranura en la fibra óptica de plástico.	26
Figura 2.37 Arreglo experimental del sensor de fibra óptica de plástico.....	26
Figura 3.1 Representación de una onda luminosa.....	28
Figura 3.2 Comportamiento del haz de luz en la Reflexión.....	29
Figura 3.3 Comportamiento de la luz en la Refracción	30
Figura 3.4 a) Espejo plano b) Espejo cóncavo c) Espejo convexo	31
Figura 3.5 Trazo de rayos en un espejo plano.....	32
Figura 3.6 Trazo de rayos en un espejo cóncavo	33
Figura 3.7 Trazo de rayos de espejo convexo	34
Figura 3.8 a) Espejo cóncavo. b) Espejo convexo	34
Figura 3.9 a) Espejo cóncavo. b) Espejo convexo	35
Figura 3.10 a) Espejo cóncavo. b) Espejo convexo	35
Figura 3.11 a) Objeto alejado del centro de curvatura. b) Objeto en el centro de curvatura. c) Objeto entre el centro de curvatura y el foco. d) Objeto en el foco	36
Figura 3.12 Objeto dentro el foco.....	36

Figura 2.13 Trazo de rayos en un espejo convexo	37
Figura 3.14 Deducción de la ecuación del espejo.....	38
Figura 3.15 Clasificación de las lentes.....	39
Figura 3.16. a) Lentes delgadas convergentes. b) Lentes delgadas divergentes	40
Figura 3.17 Rayos paralelos llegan a un foco por medio de una lente delgada convergente	40
Figura 3.18 Lente divergente	41
Figura 3.19 a) Lente cilíndrica convergente. b) Lente cilíndrica divergente ..	42
Figura 3.20 Una lente cilíndrica positiva forma la imagen de un punto axial sólo en una dirección	42
Figura 3.21 Partes básicas de la fibra óptica	44
Figura 3.22 Reflexión y refracción de una onda incidente	44
Figura 2.23 Ángulo límite de entrada	46
Figura 3.24 Cono de aceptación de luz	47
Figura 3.25 Clasificación general de las fibras ópticas	48
Figura 3.26 Modos de propagación de la luz en una fibra multimodo con salto de índice	49
Figura 3.27 Modos de propagación de la luz en una fibra multimodo con índice gradual	50
Figura 3.28 Modo de propagación de la luz en una fibra monomodo	51

Figura 3.29 Diodo láser.....	54
Figura 3.30 Trayectoria de un haz de luz láser a través de una lente plano-convexo	55
Figura 3.31 Curva característica de la relación entre potencia y corriente del diodo láser	55
Figura 3.32 Gráficas de las características espectrales del diodo laser	56
Figura 3.33 Espectro de la emisión láser	56
Figura 3.34 Ondas electromagnéticas con las misma fase, frecuencia y polarización.....	57
Figura 3.35 Divergencia de un láser	57
Figura 3.36 Curva espectral de respuesta de un fotodiodo	60
Figura 3.37 Eficiencia cuántica de fotodiodo que utilizan diferentes materiales semiconductores: silicio, germanio y arseniuro de galio e indio.....	61
Figura 3.38 Construcción de un fotodiodo <i>PIN</i>	63
Figura 3.39 El fotón agrega la energía suficiente para que el electrón pueda pasar de la banda de valencia a la banda de conducción	63
Figura 4.1 Diagrama de los elementos del sensor de nivel óptico	64
Figura 4.2 Proyección de rayos de luz en un medio cóncavo	65
Figura 4.3 Espejo plano con emisor y receptor inclinados a 26.56°	66
Figura 4.4 Espejo cóncavo con emisor y receptor inclinados a 26.56°	66

Figura 4.5 a) Espejo cóncavo con emisor perpendicular a la zona reflectora y receptor inclinado a 26.56°	66
Figura 4.6 Propagación en la emisión y reflexión del haz de luz en una superficie plana ($\theta_i = \theta_r$).....	67
Figura 4.7 Fibra óptica de plástico (TOSLINK audio).....	68
Figura 4.8 Espectro de Led y láser	69
Figura 4.9 Modulo diodo láser.....	69
Figura 4.10 Colocación del diodo laser en una estructura mecánica de desplazamiento de 2 ejes	70
Figura 4.11 Ajuste de la distancia focal en la lente microscópica	70
Figura 4.12 Medición de la potencia del diodo láser después de haber confinado la luz con el objetivo microscópico (3mW).....	71
Figura 4.13 Colocación de la fibra óptica de plástico en una estructura mecánica de desplazamiento de 3 ejes	71
Figura 4.14 Alineación de la entrada de la POF con el objetivo microscópico	72
Figura 4.15 Medición en la salida de la primera POF (fibra emisora)	74
Figura 4.16 Emisión del haz de luz en la fibra óptica (luz dispersada)	72
Figura 4.17 Emisión del haz de luz confinado con una lente esférica de 15° (Distancia focal de 0.6 cm)	72
Figura 4.18 Medición en la salida de la segunda POF (fibra receptora)	73

Figura 4.19 Medición en la salida de la segunda POF (fibra receptora) con una potencia de 2.34 μ W	73
Figura 4.20 Respuesta Espectral del fotodiodo	74
Figura 4.21 Fotodiodo OPT101.....	74
Figura 4.22 Conexión del fotodiodo OPT101 en una protoboard.....	75
Figura 4.23 Ajuste y colocación perpendicular de la fibra receptora hacia la zona de recepción del fotodiodo	75
Figura 4.24 Voltaje en la salida del fotodiodo en la máxima recepción de la señal óptica (4.18 V)	75
Figura 4.25 Señal en la salida del fotodiodo medido con el osciloscopio con variación de 320 mV	75
Figura 4.26 Esquema del filtro RC	76
Figura 4.27 Circuito esquemático del filtro en ISIS PROTEUS	77
Figura 4.28 Filtro RC y fotodiodo PIN en placa fenólica	77
Figura 4.29 Diseño del soporte de la fibra óptica receptora en Solidworks ..	78
Figura 4.30 Implementación del soporte de la fibra receptora con el fotodiodo	78
Figura 4.31 Salida de la luz hacia el fotodiodo	78
Figura 4.32 Medición del voltaje en el fotodiodo con el filtro RC.....	78
Figura 4.33 Medición en la salida del fotodiodo (con el filtro RC) utilizando el osciloscopio con variación de 60 mV	78

Figura 4.34 Región donde estará trabajando el sensor	79
Figura 4.35 Bosquejo del sensor de nivel óptico tipo flotador propuesto	80
Figura 4.36 Diseño en Solidworks de la pieza superior (cuerpo) del prototipo 1	80
Figura 4.37 Diseño en Solidworks de la pieza inferior (superficie reflectora) del prototipo 1	80
Figura 4.38 Partes laterales del prototipo 1	80
Figura 4.39 Impresión del cuerpo del sensor de nivel en la impresora 3D ...	80
Figura 4.40 Piezas ensambladas del prototipo 1 sensor de nivel óptico tipo flotador	81
Figura 4.41 Colocación de las fibras ópticas (emisora y receptora) y de la lente esférica en la primera fibra	81
Figura 4.42 Funcionamiento del prototipo 1 sensor de nivel	81
Figura 4.43 Diseño en Solidworks de la parte superior del prototipo	82
Figura 4.44 Diseño en Solidworks de la parte inferior del prototipo	82
Figura 4.45 Uso del software Simplify 3D para crear el archivo gcode para que pueda operar la impresora 3D. a) Visualización de parte superior del sensor. b) Visualización de parte inferior del sensor	82
Figura 4.46 Piezas impresas y fibras ópticas ensambladas en el prototipo 2. Sensor de nivel óptico tipo flotador	83
Figura 4.47 Vista de la emisión (uso de la lente esférica) y recepción del haz de luz en el prototipo 2	83

Figura 4.48 Funcionamiento del prototipo 2 sensor de nivel.....	83
Figura 4.49 Uso de un elemento mecánico para el desplazamiento del sensor (superficie reflectora) para obtener la inclinación (ángulo de operación).....	84
Figura 4.50 a) Flotador a 0° con elemento mecánico y b) Flotador a θ° con elemento mecánico.....	84
Figura 4.51 Inclinación 0° del flotador (voltaje máximo).....	85
Figura 4.52 Inclinación θ del flotador (voltaje mínimo).....	85
Figura 4.53 Arduino UNO como tarjeta de adquisición de datos	86
Figura 4.54 Configuración y conexiones (Arduino, diodo laser y fotodiodo) .	86
Figura 4.55 SubVI y diagrama de bloques de Voltaje/Grados	88
Figura 4.56 Representación del mecanismo del flotador	89
Figura 4.57 Diagrama de bloques y subVI del nivel de líquido	91
Figura 4.58 Diagrama de bloques general en LabVIEW	92
Figura 4.59 Pantalla de usuario en LabVIEW	93
Figura 5.1 Prototipo 1 del sensor de nivel.....	94
Figura 5.2 Diseño del prototipo 2 en Solidworks.....	95
Figura 5.3 Láminas de aluminio	95
Figura 5.4 Cuerpo del sensor y superficies reflectoras del Prototipo 2. a) Plana b) Cóncava (radio 3 cm) c) Cóncava (radio 4.6 cm)	95
Figura 5.5 Prototipo 2 en funcionamiento en la superficie cóncava	95

Figura 5.6 Superficie plana (espejo) prototipo 2	96
Figura 5.7 Superficie cóncava de radio 3 cm prototipo 2	96
Figura 5.8 Superficie cóncava de radio 4.6 cm prototipo 2	96
Figura 5.9 Diseño del prototipo 3 en Solidworks.....	97
Figura 5.10 Superficies reflectoras del prototipo 3 a) Plana b) Cóncava (radio 4.6 cm).....	97
Figura 5.11 Prototipo 3.1 en funcionamiento en la superficie cóncava	97
Figura 5.12 Superficie plana (voltaje del Arduino)	98
Figura 5.13 Superficie plana (voltaje externo)	98
Figura 5.14 Superficie cóncava de radio 4.6 cm (voltaje del Arduino)	98
Figura 5.15 Superficie cóncava de radio 4.6 cm (voltaje externo)	98
Figura 5.16 Superficie cóncava de radio 31.29 cm prototipo 3.1	99
Figura 5.17 Superficie cóncava de radio 10.56 cm prototipo 3.1	99
Figura 5.18 Superficie cóncava de radio 6.52 cm prototipo 3.1	99
Figura 5.19 Prototipo 3 en Solidworks. a) Ajuste de distancia en las fibras ópticas (emisora y receptora). b) Ajuste en la posición de zona reflejante .	100
Figura 5.20 Superficies reflectoras del prototipo 3.2 a) Plana b) Cóncava (radio 31.29 cm) c) Cóncava (radio 10.56 cm) d) Cóncava (radio 6.52 cm)	100
Figura 5.21 Prototipo 3.2 en funcionamiento en la superficie plana.....	100
Figura 5.22 Superficie plana prototipo 3.2	101

Figura 5.23 Superficie cóncava de radio 31.29 cm prototipo 3.2	101
Figura 5.24 Superficie cóncava de radio 10.56 cm prototipo 3.2	101
Figura 5.25 Superficie cóncava de radio 6.52 cm prototipo 3.2	101
Figura 5.26 Prototipo 4 en Solidworks. a) Ajuste de distancia en las fibras ópticas (emisora y receptora) b) Ajuste en la posición de zona reflejante. c) Ajuste de distancia fibras y zona reflejante	102
Figura 5.27 Superficies reflectoras del Prototipo 4. a) Cóncava (radio 3 cm) b) Cóncava (radio 5 cm) c) Plana.....	102
Figura 5.28 Superficie cóncava de radio 3 cm prototipo 4	103
Figura 5.29 Superficie cóncava de radio 5 cm prototipo 4	103
Figura 5.30 Superficie plana prototipo 4	103
Figura 5.31 Ilustraciones de los ajustes a los prototipos I) Distancia entre Fibras ópticas (emisora y receptora). II) Distancia entre Fibras ópticas y zona reflejante. III) Distancia del punto de inclinación y zona reflejante.....	104
Figura 5.32 Comportamiento del haz en una lente esférica (spot).....	105
Figura 5.33 Comportamiento del haz en una lente cilíndrica (lineal)	105
Figura 5.34 Superficie plana prototipo 4 (lente cilíndrica)	106
Figura 5.35 Superficie cóncava de radio 5 cm prototipo 4 (lente cilíndrica)	106
Figura 5.36 Superficie Cóncava de radio 3 cm (Distancia de 1.76 cm en Zona reflejante – Fibras ópticas) prototipo 4 (lente cilíndrica).....	106
Figura 5.37 Superficie cóncava de radio 3 cm (Distancia de 1 cm zona reflejante – Fibras ópticas) prototipo 4 (lente cilíndrica).	107

Figura 5.38 Prototipo 5 modular en Solidworks. A) Cuerpo. B) Soporte para Fibras ópticas receptoras. C) Pieza de distancia focal de lente cilíndrica. D) Pieza de altura (Cuerpo-Superficie reflejante). E) Superficie reflectora. F) Soportes de superficies reflectoras.....	108
Figura 5.39 Prototipo 5 modular en funcionamiento con la superficie reflectora plana (espejo)	109
Figura 5.40 Superficies reflectora cóncava de radio 2.25 cm	109
Figura 5.41 Superficie plana (lente cilíndrica) prototipo 5	109
Figura 5.42 Superficie cóncava radio 2.5 cm (lente cilíndrica) prototipo 5..	109
Figura 5.43 Ilustraciones de los ajustes a los prototipos I) Distancia entre Fibras ópticas (emisora y receptora). II) Distancia entre Fibras ópticas y zona reflejante. III) Distancia del punto de inclinación y zona reflejante.....	110
Figura 5.44 Circuito amplificador con el LM324 con ganancia de 9.8.....	111
Figura 5.45 Comportamiento de la señal Voltaje – Ángulo en la superficie plana con lente cilíndrica en Prototipo 5	112
Figura 5.46 Comparación se señal real respecto a la ecuación generada por el software Origin en ángulo	113
Figura 5.47 Tarjeta DAQ NI y Tarjeta Arduino UNO	113
Figura 5.48 Gráfica de voltaje respecto a un desplazamiento de 0.0254 mm comprendido en un rango de operación (15.65° a 21.07°)	114
Figura 5.49 Inclinación mayor de fibras ópticas	115
Figura 5.50 Inclinación mayor de fibras ópticas	115

Figura 5.51 Zona reflejante a) Cercano b) Lejano	115
Figura 5.52 Superficie plana prototipo 2	116
Figura 5.53 Superficie cóncava radio 3 cm prototipo 2	116
Figura 5.54 Superficie cóncava radio 4.6 cm prototipo 2	116
Figura 5.55 Superficie plana prototipo 3	116
Figura 5.56 Superficie cóncava radio 31.3 cm prototipo 3	116
Figura 5.57 Superficie cóncava radio 10.57 cm prototipo 3	117
Figura 5.58 Superficie cóncava radio 6.5 cm prototipo 3	117
Figura 5.59 Superficie plana prototipo 4	117
Figura 5.60 Superficie cóncava radio 3 cm prototipo 4	117
Figura 5.61 Superficie cóncava radio 5 cm prototipo 4	117
Figura 5.62 Superficie plana prototipo 5	118
Figura 5.63 Superficie cóncava radio 2.25 cm prototipo	118

CAPÍTULO 1 Introducción

Dentro de los procesos industriales, la medición y el control de nivel se hace necesario cuando se pretende tener una producción, también cuando un proceso requiere de control y medición de volúmenes de líquidos o en el caso más simple, para evitar que un líquido se derrame dentro de un recipiente; el control de nivel entre dos puntos, es una de las aplicaciones más comunes de los instrumentos para controlar y medir el nivel. Los sensores de nivel se usan para determinar la cantidad de producto (líquido o sólido) que se tiene en los tanques de almacenamiento o de procedimiento, en la industria moderna es esencial la medición de nivel de un tanque y esto se puede hacer por medio de la variedad de sensores.

1.1 Planteamiento del problema

La necesidad de medir el nivel de líquidos de tanques o depósitos con alto grado de explosividad tiene a ser un gran problema para varios sensores electrónicos, así que la medición óptica puede brindar en gran medida este tipo de campo. Existen diversos sensores de nivel de líquidos de los cuales no se encuentran comercialmente los ópticos del tipo flotador.

1.2 Justificación

De acuerdo a lo comentado anteriormente, cabe resaltar que los sensores ópticos con fibras ópticas, son dispositivos que no generan chispas, no se ven afectados por campos magnéticos, no conducen electricidad y no generan calor, por lo cual pueden ser muy bien utilizados en tanques que generan vapores explosivos o corrosivos. En el mercado e investigación no se encuentra un sensor con las características que se desean diseñar;

sensor de nivel óptico tipo flotador. Cuenta con la ventaja de trabajar en depósitos abiertos o cerrados y el costo es bajo.

1.3 Hipótesis

Basado en la reflexión de luz sobre un medio plano o cóncavo debido a un ángulo de inclinación debe ser posible determinar la posición del haz si se coloca un arreglo en forma lineal de N fibras ópticas.

1.4 Objetivos

El objetivo de este trabajo es:

- Diseñar e implementar un sensor de nivel en líquido, utilizando métodos ópticos.

Con lo que respecta a los objetivos específicos corresponden:

- Trazo de rayos de la geometría de la zona reflejante y receptora
- Determinar el diseño para la emisión y detección de la señal
- Diseñar un circuito de control del emisor y receptor
- Determinar el rango máximo de operación del sensor.

1.5 Resultados esperados

- Modelo analítico de la geometría de rayo.
- Diseño de la emisión y detección de la señal (equipo).
- Conocimiento del rango de operación del sensor de nivel.
- Implementación del sensor de nivel óptico.

CAPÍTULO 2 Estado del arte

En la industria, la medición de nivel de líquidos es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas de productos finales.

Los medidores de nivel de líquidos operan midiendo, bien directamente la altura de líquido sobre una línea de referencia, la presión hidrostática, el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido contenido en el tanque del proceso, aprovechando características eléctricas del líquido o bien utilizando otros fenómenos. [1]

2.1 Clasificación general de los sensores de nivel

De una manera general se puede clasificar los sensores de nivel en dos categorías:

- Puntuales, que solo indican una determinada altura de un líquido, que permiten ser utilizados como alarmas cuando se presenta alguna condición de desbordamiento o de señalar algún nivel bajo.
- Continuos, que pueden proporcionar un monitoreo de nivel para un sistema determinado. [2]

De acuerdo a lo presentado anteriormente, se presenta un desglose más detallado de la clasificación de forma:

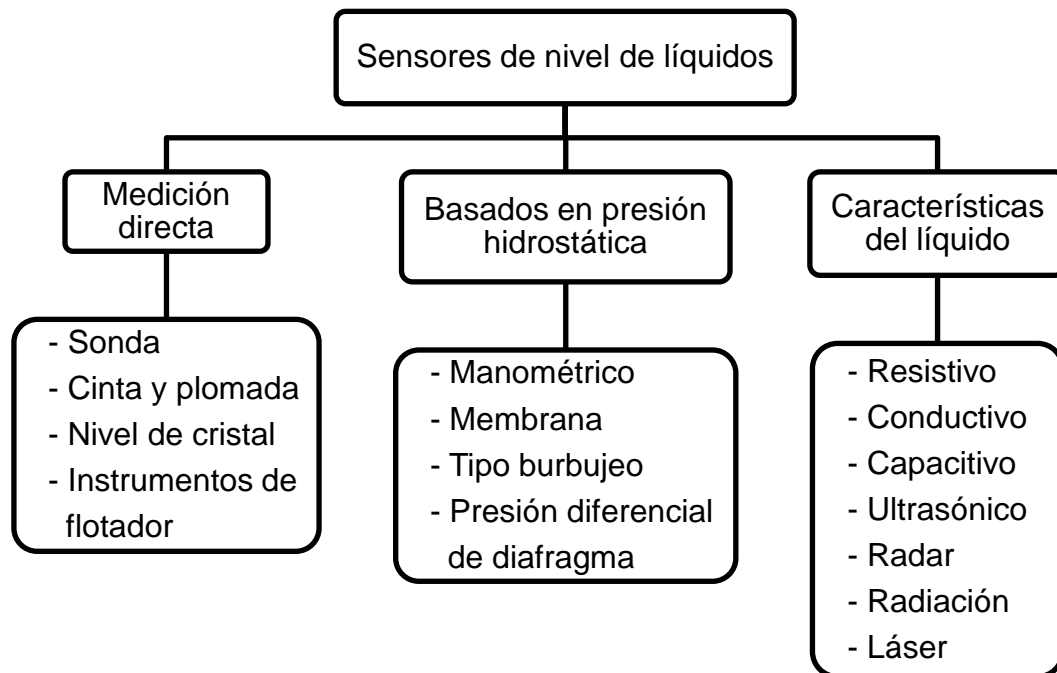


Figura 2.1 Diagrama de clasificación de los sensores de nivel de líquidos. [2]

En la industria están presentes los procesos de medición y control de nivel, el cual es necesario cuando se pretende hacer una producción continua, o evitar que se derrame un líquido, la Figura 2.2 muestra los sensores más utilizados y serán descritos más adelante para conocer cada uno sus características.

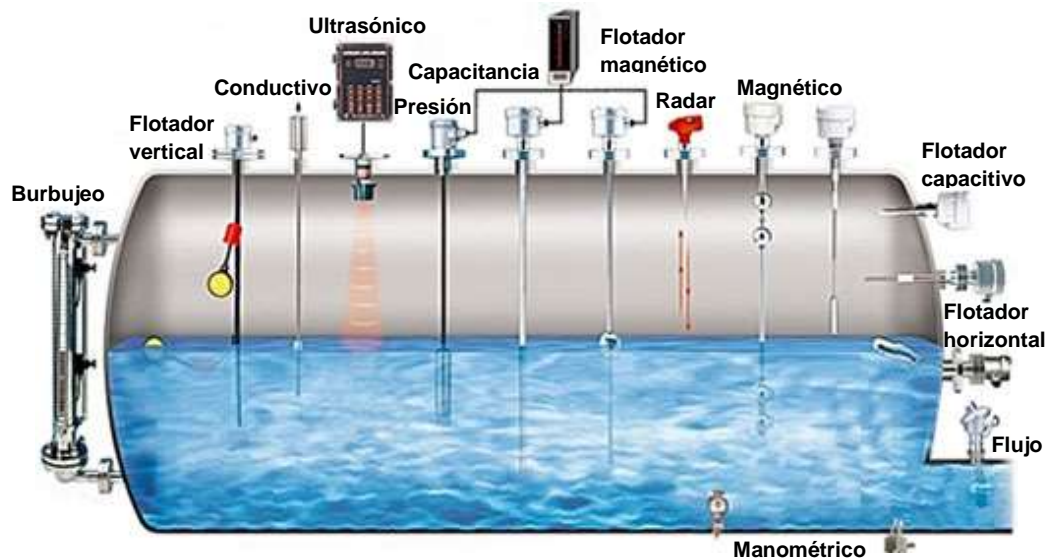


Figura 2.2 Sensores de nivel en la industria. [3]

Sensores de sonda: Consisten en una regla o varilla de acero graduada o aforada, esta se introduce en el depósito del fluido el cual se debe encontrar a presión atmosférica, y se retira, el nivel será lo que el fluido halla mojado, cabe resaltar que la parte inferior de la varilla o regla debe llegar a la superficie del depósito (Figura 2.3a). Otro instrumento que pertenece a esta clasificación es una varilla con un gancho (Figura 2.3b), cinta y plomada (Figura 2.3c), este último tiene un peso denominado plomada que hace que la cinta descienda en el fluido y la medición se realiza en la cinta graduada.

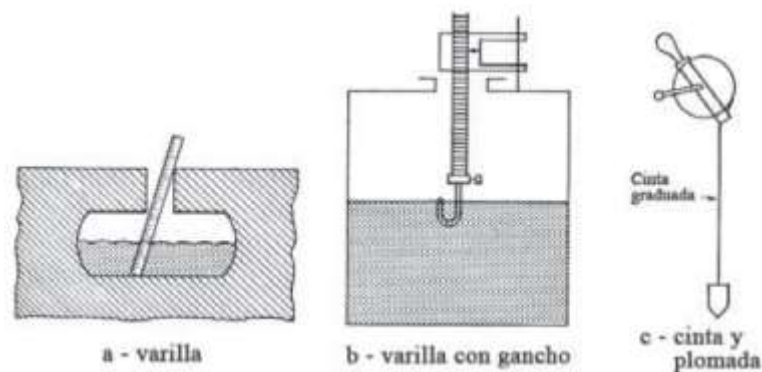


Figura 2.3 Sensores de sonda. [2]

Nivel de cristal: El nivel de cristal o columna indicadora consiste en un cilindro de vidrio el cual se encuentra sujeto por barras de metal, este tiene 3 válvulas, 2 de cierre de seguridad en los extremos y una de purga, el funcionamiento se basa en que el líquido a medir dentro de la columna busca la misma elevación que en el depósito, sección rectangular, la medida de nivel se efectúa con un cristal de reflexión (El vidrio que está en contacto con el líquido está provisto de ranuras longitudinales que actúan como prismas de reflexión indicando la zona de líquido con un color oscuro, y la zona superior en contacto con el vapor de color claro) o por transparencia (Permiten medir directamente el nivel por medio de la graduación del nivel, además permiten ver las características visuales del líquido. A esta clasificación corresponden dos tipos de medidores de cristal, el nivel de

cristal normal (Figura 2.4a), el cual se emplea para presiones de hasta 7 bar. Y para presiones más altas de hasta 3103 kPa (31 bar) se emplea el nivel de cristal con una armadura metálica que lo protege. (Figura 2.4b).

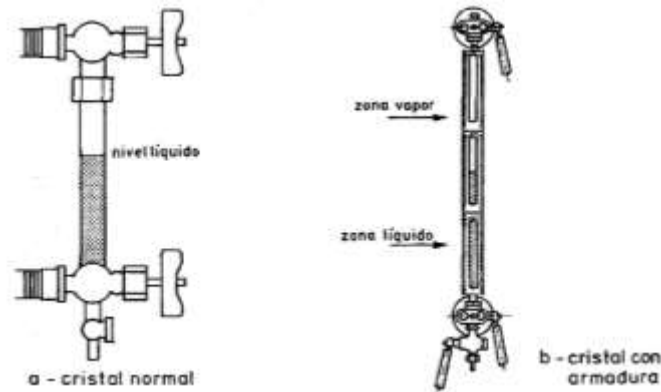


Figura 2.4 Sensores de nivel de cristal. [2]

Sensores de flotador: Son usados principalmente en sistemas de líquido – gas, aunque también se puede implementar en interfaces líquido – líquido con un peso apropiado del flotador; consisten en un flotador que se encuentra en la parte superior del líquido y conectado al exterior del tanque o deposito indicando directamente el nivel, del método empleado para acoplar el movimiento del flotador con el sistema indicador se clasifican en: *conexión directa* (Figura 2.5a), si el flotador está unido al indicador por una cadena o cinta flexible que desliza un juego de poleas señalando el nivel en una escala graduada; *conexión magnética*, el movimiento del flotador es transmitido por medio de un acoplamiento magnético (Figura 2.5b), este tipo de medidor tiene un tubo en el cual hay una pieza magnética suspendida por medio de una cinta, esta sigue al flotador en su movimiento y mediante la cinta o cable y un juego de poleas arrastra el índice del indicador de nivel situado en el exterior del tanque; *conexión hidráulica* (Figura 2.5c), los cuales funcionan por variaciones de presión de un circuito hidráulico y señala en el indicador el nivel correspondiente.

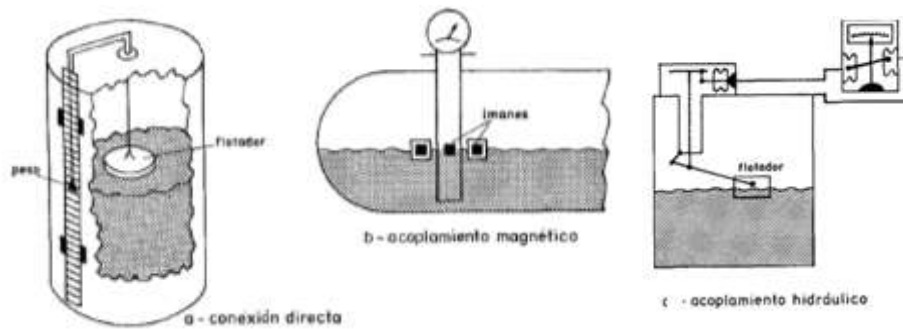


Figura 2.5 Sensores de flotador con mecanismo de flotador. [2]

Basados en la presión hidrostática: Estos equipos son regidos por la siguiente ecuación (relación entre el nivel y presión):

$$h = \frac{P + P_0}{g\rho},$$

(ecuación 2.1)

donde:

P = Presión en la parte inferior del tanque.

P_0 = Presión atmosférica.

ρ = Densidad.

g = Aceleración de la gravedad.

h = Altura o nivel del fluido.

Si el tanque se encuentra cerrado, entonces $P_0 = 0$, pues sobre el no actúa la presión atmosférica.

Medidor manométrico: Este medidor consiste en un manómetro que se encuentra conectado en la parte inferior del tanque donde está contenido el fluido, el nivel se mide por la presión que ejerce el fluido, en la Figura 2.6, se puede observar un sistema que mide el nivel de fluido en un contenedor por medio de un medidor manométrico.

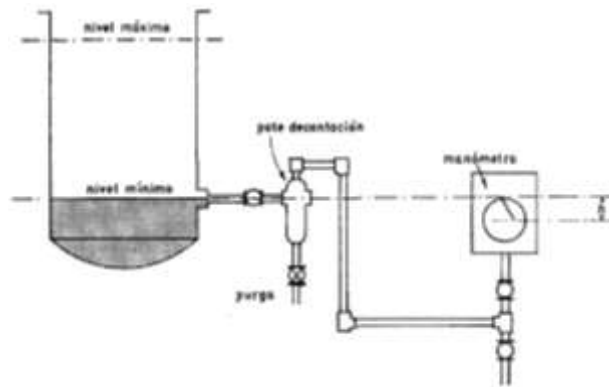


Figura 2.6 Sensor de nivel manométrico. [2]

Sensor de membrana: Este tipo de medidor consiste en un diafragma que tiene en su interior aire y en la parte superior una membrana que tiene contacto con el fluido, entonces la presión ejercida por el fluido hace que el aire se comprime (Figura 2.7).

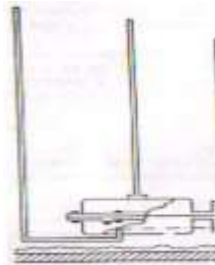


Figura 2.7 Sensor de membrana. [2]

Sensor de tipo Burbujeo: Este instrumento mide la presión necesaria para poder formar o sacar burbujas de una tubería que suele ser de $\frac{1}{2}$ " esta tiene un bisel por donde salen las burbujas, en el interior del tubo hay un gas que generalmente es aire y tiene un rotámetro que regula que el caudal sea el mismo, entonces la presión que ejerce el gas en el líquido para poder hacer salir burbujas se considera como la presión hidrostática de la columna de líquido contenida en el tanque (Figura 2.8).

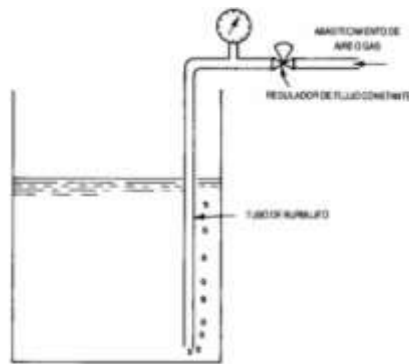


Figura 2.8 Sensor de tipo burbujeo. [2]

Sensor Conductivo: Este tipo de medidor utiliza la conductividad del líquido, consiste en uno o varios electrodos y un relé electrónico que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar y de este modo el aparato puede discriminar la separación entre el líquido y el vapor.

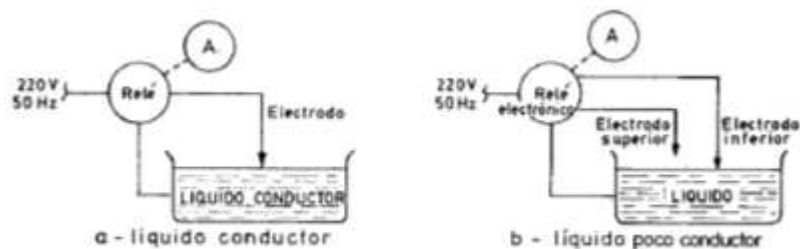


Figura 2.9 Sensores de nivel conductivo. [2]

Sensor Capacitivo: Mide la capacidad del condensador formado por el electrodo sumergido en el líquido y las paredes del tanque como se indica en la Figura 2.9, la capacidad del conjunto depende linealmente del nivel del líquido; en los fluidos conductores se emplea un electrodo normal, en fluidos conductores con conductividad mínima de $100 \mu\Omega/\text{c.c.}$ el electrodo está aislado usualmente con teflón interviniendo las capacidades adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y el gas.

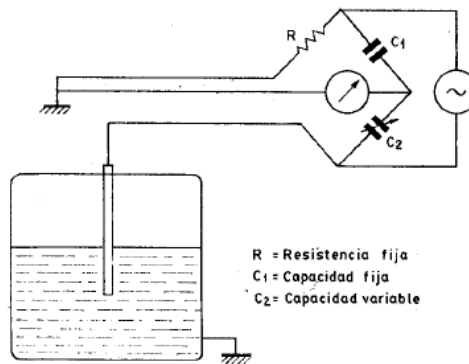


Figura 2.10 Sensores de nivel capacitivo. [2]

Sensor Ultrasónico: Este medidor se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo en un receptor. El retardo en la captación del eco depende del nivel del tanque, los sensores trabajan a una frecuencia de 20 kHz.

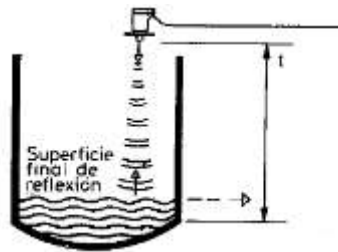


Figura 2.11 Sensor ultrasónico. [2]

Sensor de radar: Este sistema emplea la propagación de una onda de microondas, y un oscilador que genera una frecuencia de barrido de 10 a 11 GHz y enfoca la señal sobre el líquido mediante una antena; la diferencia de frecuencias entre las señales de transmisión y de retorno es proporcional al tiempo empleado por las mismas.



Figura 2.12 Sensor radar. [2]

Sensor de radiación: Consiste en un emisor de rayos gamma dispuesto en un lado del tanque y con un contador Geiger, que transforma la radiación gamma recibida en una señal eléctrica de corriente continua. Como la transmisión de los rayos es inversamente proporcional a la masa del líquido en el tanque, la radiación captada por el receptor es inversamente proporcional al nivel del líquido ya que el material absorbe parte de la energía emitida.

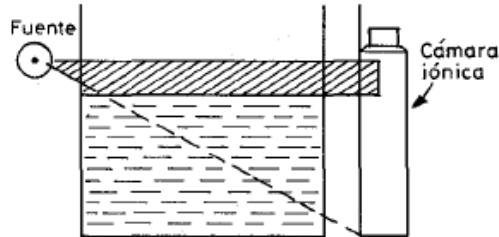


Figura 2.13 Sensor de rayos gamma. [2]

Sensor Láser: Consiste en un rayo láser enviado a través de un tubo de acero y dirigido por reflexión en un espejo sobre la superficie del fluido, la medida realizada es el tiempo que transcurre entre el impulso emitido y el impulso de retorno, un microprocesador convierte el tiempo al valor de la distancia, es decir, la lectura de nivel. [2]

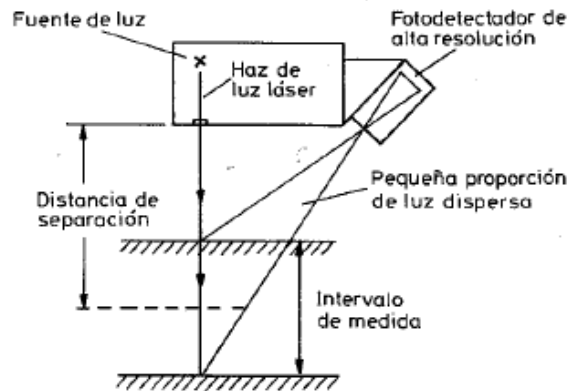


Figura 2.14 Sensor de rayos gamma. [2]

2.2 Campo de Investigación de los sensores de nivel

En el ámbito de la investigación se presentan diferentes trabajos tomados como sensores de nivel óptico:

Sensor de nivel de gasolina. Es basado por la interacción de un haz de luz del láser, la cual pasa por un acoplador de fibra y se divide por la mitad el haz de luz. Mientras esa mitad de haz de luz, llega a la membrana y se refleja. Pero de acuerdo a la cantidad de líquido que tenga el contenedor, la membrana cambiará de tamaño y esto implica que la distancia que hay entre la fibra y la membrana cambie respecto a la cantidad del líquido. Ahora la cantidad del haz de luz que pasa por la membrana se refleja y disminuye a la mitad, teniendo en la señal reflejada el 25% que va dirigida al detector. También se encuentra el caso, cuando la membrana está localizada en la fibra, donde es más sensible el cambio de desplazamiento de la membrana y el depósito. [4]

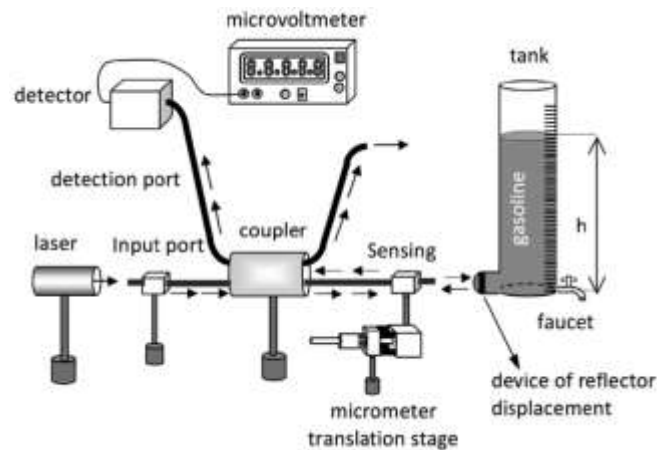


Figura 2.15 Arreglo experimental del sensor de nivel de gasolina. [4]

Sensor a base de una lente ágil para ambientes extremos. Es basado su funcionamiento en el enfoque que tiene un dispositivo controlado electrónicamente para el enfoque del lente de foco (ECVFL), que es usado para cambiar la intensidad del haz óptico de baja potencia que cae sobre la superficie del líquido. Esto ocasiona que la lente tome la medida de la profundidad que hay en el depósito de acuerdo con la cantidad de sustancia que se encuentre dentro. [5]

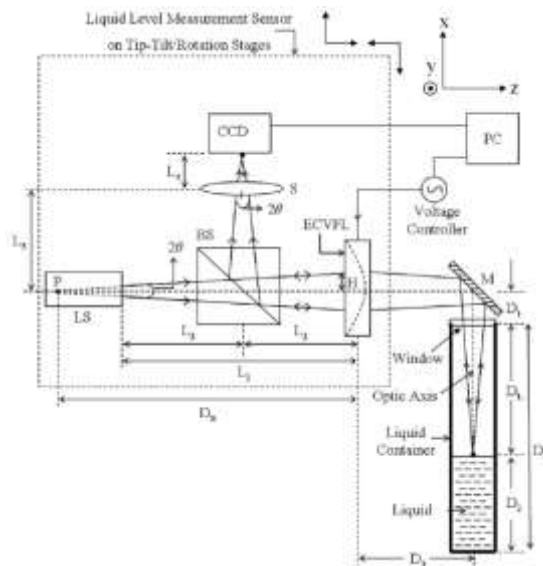


Figura 2.16 Esquema experimental del sensor óptico. [5]

Sensores de fibras con rejillas de Bragg en líquidos para el monitoreo.

Implica que al modificar la fibra, en este caso hacer una cavidad curva, se presentan interferencias en la longitud de onda y al monitorear el sistema, se tiene el desplazamiento de la longitud de onda de acuerdo a la cantidad de líquido que se contenga. [6]

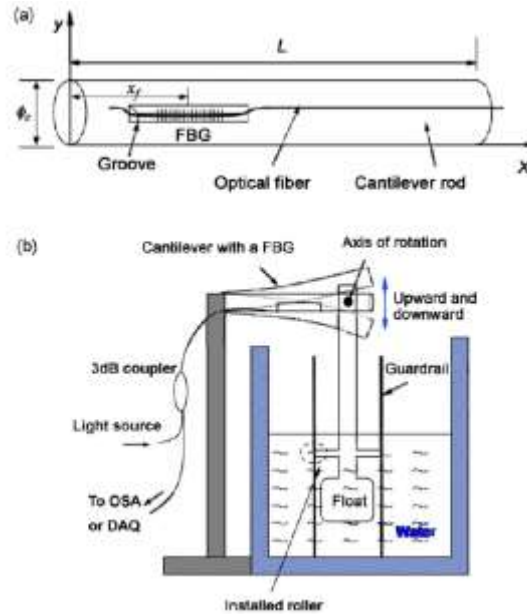


Figura 2.17 a) Estructura básica de la viga con la fibra de rejilla de Bragg. b) Configuración experimental del sensor de nivel. [6]

Detección de variación del nivel de líquido usando una estructura de fibra SMS (monomodo-multimodo-monomodo). Demostrado mediante la sensibilidad del índice relativo de la fibra SMS para medir la longitud de una fibra inmersa en un líquido. La resonancia de la longitud de onda exhibe un desplazamiento de 4 nm con la variación de líquido de 4 mm. [7].

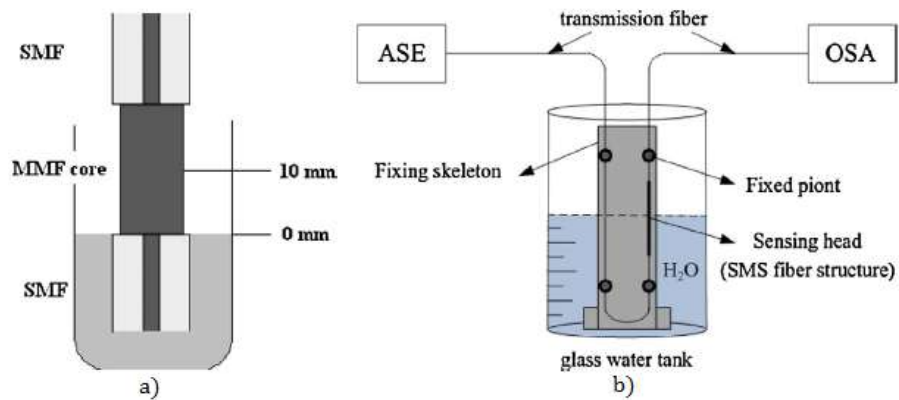


Figura 2.18 a) Esquema del sensor basado en una fibra SMS. b) Diagrama del arreglo experimental. [7]

Sensor de nivel de líquido multipunto basado en pérdidas de curvatura basadas en fibras ópticas de plástico. Es realizado un pulido en la parte del núcleo de fibras ópticas de plástico, donde en la zona curvada se pone al descubierto el núcleo de la fibra, aumentando para el haz de luz que se propaga, la sensibilidad con el medio exterior. Sobre un mismo trozo de fibra se han practicado 8 puntos de zonas curvadas de 180°, cada una de las cuales presenta una atenuación que es detectada. [8]

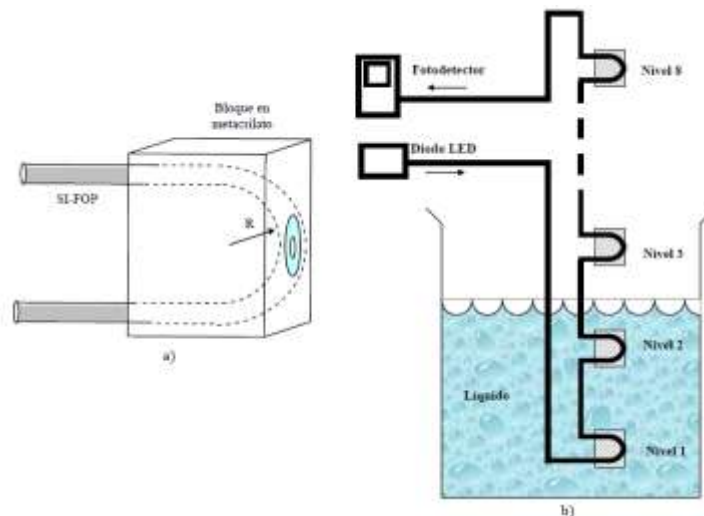


Figura 2.19 a) Construcción del sensor basado en pérdidas de curvatura. b) Esquema del funcionamiento del sensor. [8]

Sensores de líquido que utilizan la intensidad de refracción en la cara final de una fibra de vidrio conectada a una fibra de rejilla de Bragg.

Cuentan con el principio de operación de la ley de Fresnel de reflexión en la cara final de fibras de silicio, y son probadas las de tipo monomodo y multimodo. Sus respuestas espectrales son medidas con respecto a la modulación de intensidad causada por un cambio en el índice de refracción del medio rodeado. Para comparar la potencia óptica de salida del sensor es expuesto a pruebas del aire y agua, por lo que se demostró su potencial como sensor de inmersión sensible. La diferencia en los niveles de potencia de salida exhibe entre el aire y agua 10 dB. Más adelante, una fibra de rejilla de Bragg (FBG) empalmada al sensor fue usado como monitoreo remoto de cualquier fibra óptica o el sensor fuera dañado o no. [9]

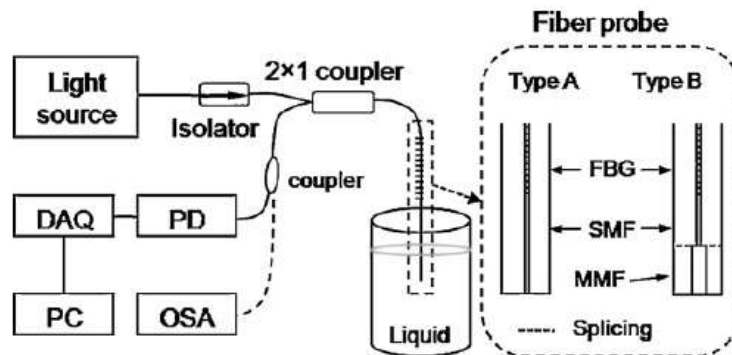


Figura 2.20 Diagrama y arreglo experimental del sensor. [9]

Medición de nivel de aceite en transformador de potencia usando un sensor óptico. Es basando mediante la intensidad del sensor óptico, ya que el revestimiento elimina porciones de una fibra multimodo actuando como sensor que trabaja bajo el principio de interacción de onda evanescente. El principio de operación consiste que la intensidad de la luz es perturbada por el cambio de proximidad de aire o aceite al sensor. Los fenómenos de refracción y reflexión total interna son utilizados en la experimentación. La intensidad de luz se detecta y analiza utilizando una LDR (resistencia dependiente de la luz) y LabVIEW, en el extremo de detección que

proporciona la lectura correspondiente del nivel de aceite del transformador en el que se sumerge la fibra óptica. Se introduce una fibra de referencia en paralelo con la fibra de detección para eliminar la variación de intensidad de luz de la fuente y la variación de temperatura del aceite del transformador. El sensor óptico es adecuado para la monitorización en tiempo real del aceite del transformador de potencia. [10]

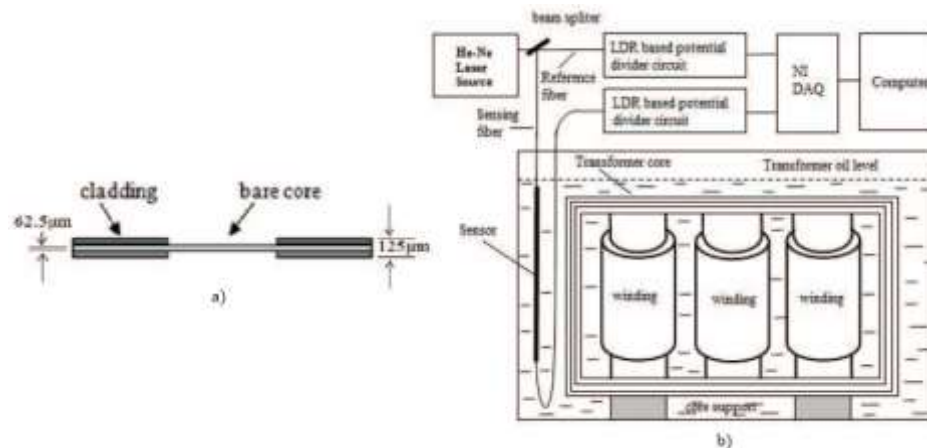


Figura 2.21 a) Diseño del sensor. b) Arreglo experimental. [10]

Sensor de fibra laser para nivel de líquido y temperatura basado en estructura de dos taper y fibras de rejillas de Bragg. La constituyen las dos estructuras de taper que forman un nuevo interferómetro de fibra. Su funcionamiento consiste en que el primer taper actúa como un acoplador de modo que hace que la luz de entrada se acople al núcleo y revestimiento de la fibra monomodo (SMF). La mitad de la fibra monomodo (SMF) actúa como sección de detección. El segundo taper también actúa como un acoplador de modo. Las luces del núcleo y del revestimiento interfieren entre sí en el segundo taper. Es fabricado mediante la conexión en cascada de dos tapers en una sección de la fibra monomodo (SMF). La FBG y el interferómetro sirven como filtros de la cavidad láser. Correspondiendo a los dos filtros, las salidas del láser son salidas estables de longitud de onda dual, las cuales

tienen características diferentes al nivel líquido y temperatura. La longitud de onda producida por la FBG no es sensible al nivel del líquido. [11]

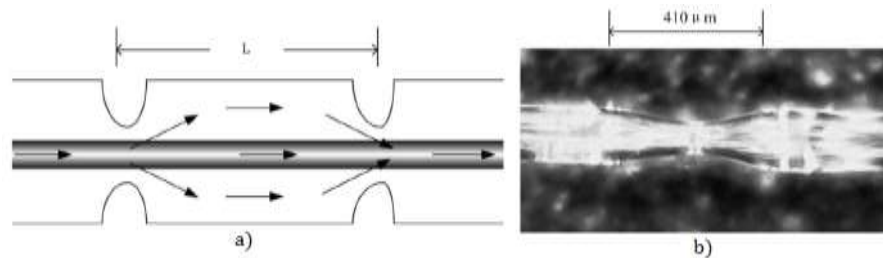


Figura 2.22 a) Diagrama esquemático del interferómetro. b) Imagen microscópica del taper. [11]

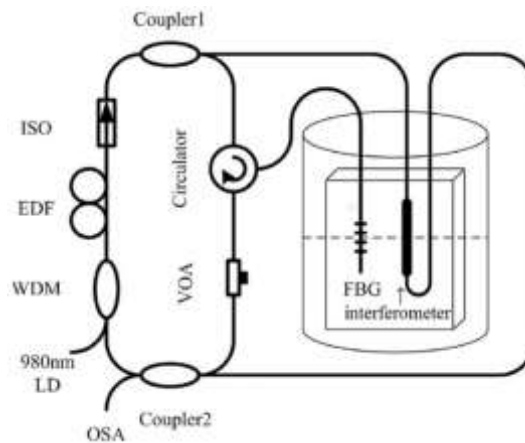


Figura 2.23 Diagrama esquemático de la configuración experimental. [11]

Un nuevo método de detección de nivel de líquido y su implementación.

La propuesta es utilizando leds y fototransistores colocados recíprocamente cuyos ejes ópticos se desplazan de acuerdo el uno al otro. La distancia de desplazamiento se determina por la dirección del cambio en el nivel del fluido. El valor mínimo de la distancia de desplazamiento depende de las dimensiones del led y del fototransistor. El sistema es controlado por un microprocesador. Los pulsos tienen una duración de 100 μ s y un ciclo de trabajo del 25% que son generados en las salidas A y B del microprocesador. Estos pulsos son desplazamientos en el dominio del tiempo con una duración

de 150 μs de acuerdo uno al otro y se dan a los sensores para la detección del nivel mínimo y máximo. [12]

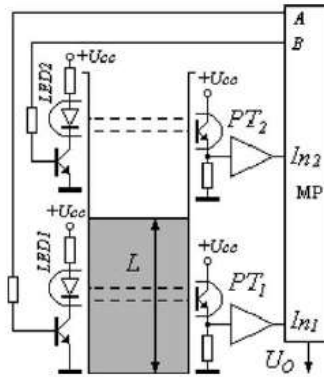


Figura 2.24 Diagrama de circuito del sensor de detección de nivel. [12]

Un sensor óptico de nivel de líquido basado en un interferómetro modal de fibra con polarización fija. El sensor cuenta con un ensamblaje en la cintura de la fibra, con una longitud de 35 mm de fibra de polarización fija (PMF) que es empalmada entre dos fibras monomodo (SMF), para construir el interferómetro modal de fibra. El principio del interferómetro consiste en que la onda de luz se propaga en la SMF de entrada con un modo fundamental, donde la mayoría de la energía de luz está en el núcleo. Cuando la luz pasa a través del primera cintura del Taper de fibra, puesto que el diámetro del núcleo no coincide, la porción de luz de acopla en la capa del revestimiento de la PMF y otra porción de luz se acopla al núcleo de la PMF con el modo fundamental. En la segunda cintura del Taper de fibra, los dos haces se recombinan y son parcialmente reacoplados en el núcleo de la SMF de salida. [13]

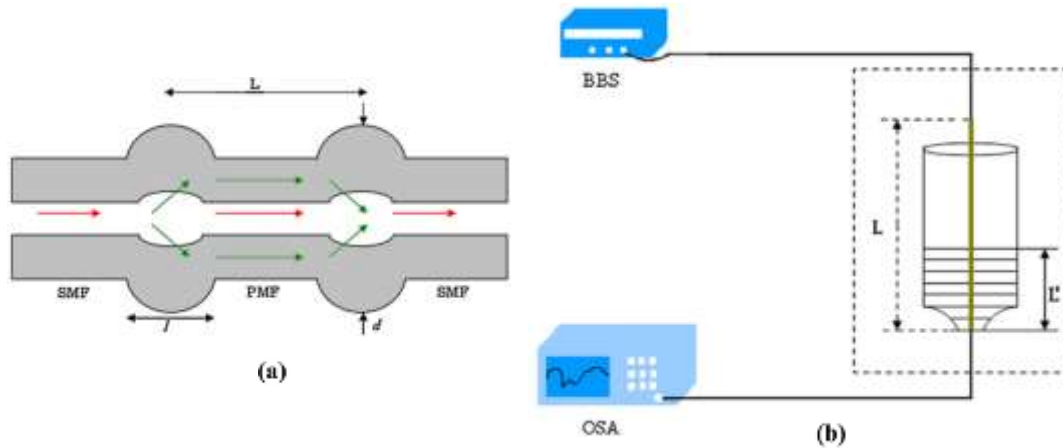


Figura 2.25 a) Dibujo parcialmente ampliado de la cabeza del sensor. b) Diagrama esquemático del sensor de nivel propuesto. [13]

Diseño y demostración de un sensor de fibra de nivel de líquido basado en el efecto auto-imagen.

Es basado bajo las propiedades de auto-imagen de la interferencia multimodal en una fibra sin núcleo (NCF). Tomando la simulación del método de propagación del haz (BPM), se selecciona una NCF de longitud óptica para actuar como cabezal del sensor y filtro sintonizable en un láser de fibra de cavidad anular. Para sensar el nivel de líquido alto, se diseña una configuración basada en el principio del equilibrio de presión atmosférica y la sensibilidad se aumenta 5 veces. Se puede detectar un rango de 50 cm de nivel del líquido mediante el control del desplazamiento de longitud de onda pico del láser de salida. [14]

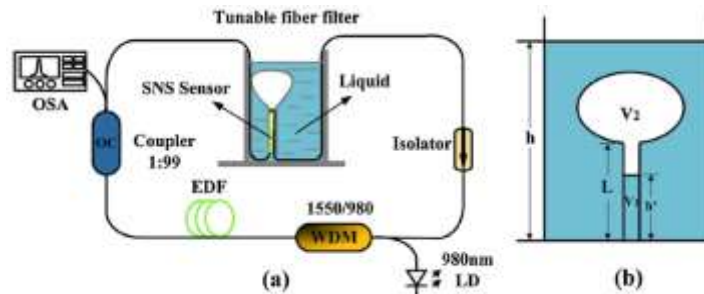


Figura 2.26 a) Esquema experimental del sensor de fibra óptica para medición del líquido. b) Esquema de conversión de nivel de líquido. [14]

Diseño y operación de un sensor de fibra óptica para la detección de nivel de líquido. Este sensor opera mediante la modulación de la intensidad de la luz, y resulta de la alteración de la reflexión total interna dentro de la reflexión parcial en la interfaz. La intensidad modulada ha sido medido utilizando un par de fibras, una de fuente de transmisión de luz y otra que actúa como fibra receptora, y un prisma de vidrio que proporciona reflexiones total y parcial. Durante las mediciones de nivel, cuando un líquido en un saó toca la cara de 45° del prisma de 45°- 90°- 45°, la reflexión total interna es alterada y la luz reflejante es modulada. El rendimiento del sensor se prueba con diferentes fuentes de luz, incluyendo un diodo emisor de luz (LED), un diodo láser y un láser de He-Ne. [15]

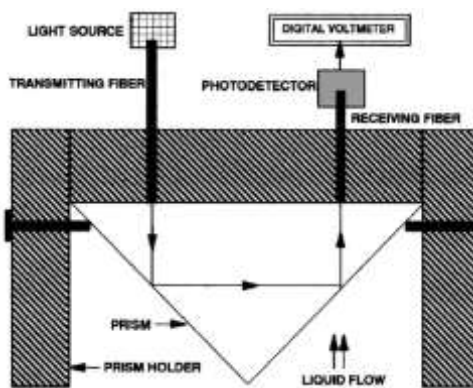


Figura 2.27 Diagrama del sistema experimental (sensor de fibra óptica). [15]

Diseño y operación de un sensor de fibra óptica evanescente. Los sensores evanescentes se basan en la pérdida mensurable de guía de una fibra óptica como medio para detectar cambios externos. El acoplamiento evanescente ocurre cuando la luz se propaga a través de modos de superficie en un material. Éstos permiten la transferencia de luz desde el medio de propagación hacia su entorno. El acoplamiento evanescente es más eficiente cuando los dos materiales tienen índices de refracción similares. El sensor es un dispositivo de intensidad en el que la luz guiada se pierde debido a la onda evanescente en la interfaz. Por ejemplo, cuando

cambia el índice de refracción del material circundante alrededor de una fibra óptica, se puede medir la modulación de intensidad, ya que se consideran dos mecanismos, la pérdida de potencia óptica y la operación del sensor. El funcionamiento del sensor es probado como un sensor de nivel de líquido para agua, por lo que la activación es lograda mediante el pelado de la parte del revestimiento de la fibra óptica, para provocar la atenuación de la luz transmisora como resultado del contacto del líquido. El sistema propuesto consiste de una fuente de luz, una fibra transmisora, un fotodetector y un voltímetro digital para la monitorización del voltaje de salida. [16]

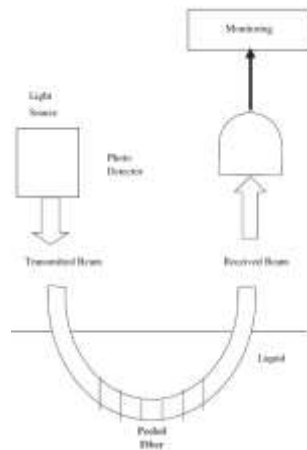


Figura 2.28 Arreglo experimental del sensor de fibra óptica evanescente. [16]

Sensor óptico de nivel de líquido en ambientes criogénicos. Los ambientes criogénicos son llevados a cabo con el uso de nitrógeno líquido e hidrógeno. El sistema del sensor comprende de un arreglo multiplexado de sondas de punta líquida, éstas son dos diseños diferentes (ambos usan un prisma de ángulo recto como sensor, una tiene la cara hacia abajo más corta, mientras que la otra, tiene la cara hacia abajo en la hipotenusa). Las pruebas fueron realizadas en ambientes de agua-aire y nitrógeno líquido-gas. Es utilizado un dispositivo OTDR (Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo) para el multiplexado de múltiples sondas de líquido. [17]

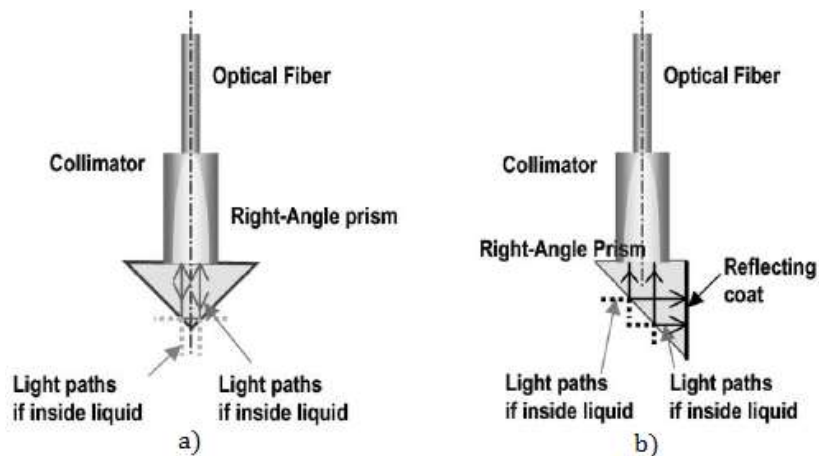


Figura 2.29 Sondas a) Cara más corta b) Cara en la hipotenusa. [17]

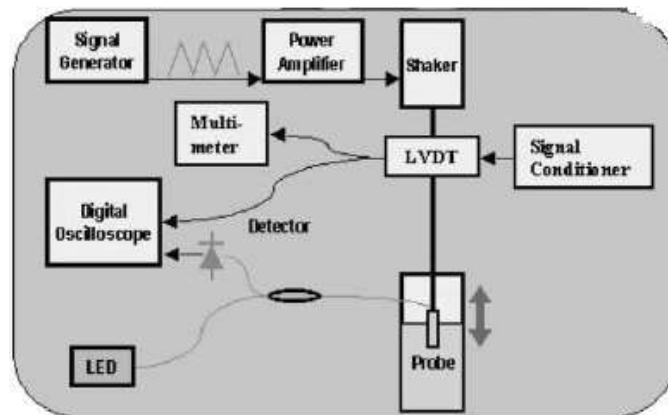


Figura 2.30 Configuración experimental para la medición de tiempo de respuesta de la sonda. [17]

Diseño y funcionamiento de un sensor de fuga (escape) de fibra óptica de plástico. Basado en la fuga de luz no convencional de una fibra a otra que causa la modulación de intensidad y se encuentra que el mecanismo de pérdida es el fenómeno de pérdida evanescente. El cálculo de la profundidad de la onda evanescente es en función del índice de refracción del revestimiento. Su funcionamiento fue probado para diferentes líquidos, el cual las mediciones fueron a señales secas (capa de interfaz del aire) y salidas húmedas (capa de interfaz del líquido) para la sonda. [18]

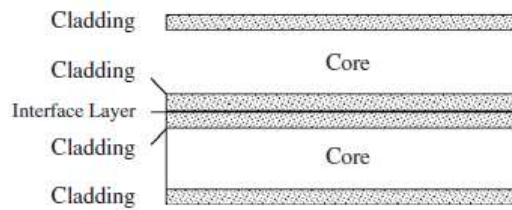


Figura 2.31 Arreglo del diseño de la sonda de fibra óptica de plástico. [18]

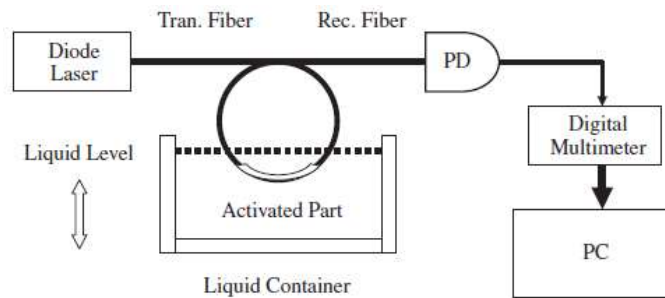


Figura 2.32 Arreglo experimental del sensor de fibra óptica de plástico. [18]

Medidor continuo de nivel de líquido de fibra óptica. El principio de operación se basa en la reflexión total interna de la luz dentro de la fibra óptica, y para ello se realiza una medición de la atenuación de potencia que se produce en la fibra óptica sumergida en el tanque de líquido cuando el nivel está variando. La luz de un led es modulada antes de ser dirigida a la fibra para minimizar los errores de medición. El dispositivo contiene una alarma programable para señalar cualquier nivel de líquido en el tanque (alto o bajo), y los datos pueden ser enviados a través de internet en tiempo real a un punto distante. [19]

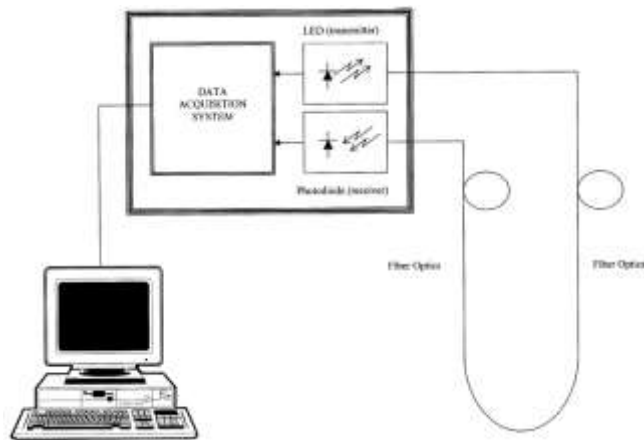


Figura 2.33 Esquema general del medidor continuo de nivel de líquido. [19]

Sensor de nivel de líquido de fibra óptica. Se basa en la reflexión total interna de luz, que es perturbada por el contacto con un líquido. El sensor de nivel líquido tiene cuatro partes principales: el soporte del sensor, soporte de la fibra, la prensa de cable de fibra y el elemento sensible que está hecho de polisulfona, un material hidrófobo (sustancia que son repelidas por el agua o que no se pueden mezclar con ella). El rendimiento del sensor es debido al uso de cuatro formas de elementos sensibles: cónico, cóncavo redondeado, polinomio de segundo orden y polinomio de tercer orden. [20]

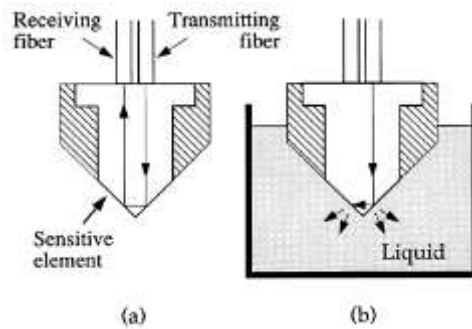


Figura 2.34 Principios de operación a) el sensor en el aire b) el sensor en el líquido. [20]

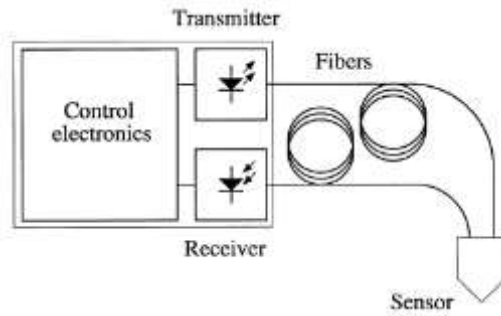


Figura 2.35 Sistema del sensor de nivel de líquido. [20]

Medidor de nivel de líquido basado en fibra óptica de plástico. El sensor consiste en una fibra vertical, con ranuras grabadas, que estarán secuencialmente cumpliendo cuando el líquido se eleve en la fibra, dando como resultado un aumento de la potencia óptica transmitida. [21]

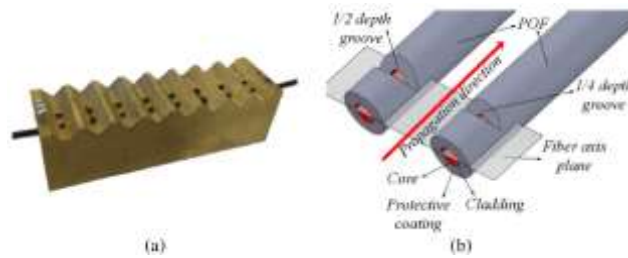


Figura 2.36 a) Molde de latón utilizado para crear las ranuras de la fibra b) Esquema de una ranura en la fibra óptica de plástico. [21]

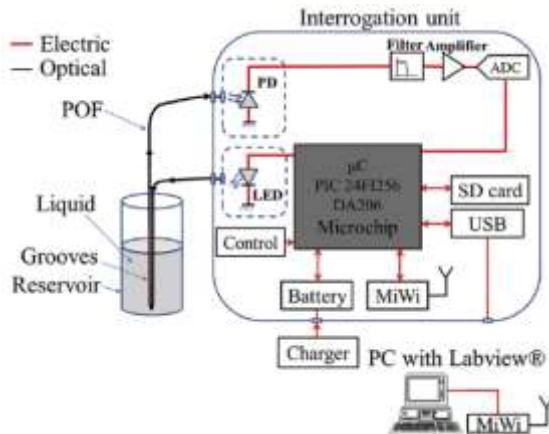


Figura 2.37 Arreglo experimental del sensor de fibra óptica de plástico. [21]

CAPÍTULO 3 Marco teórico

En este capítulo se presentan las bases teóricas que permiten comprender el funcionamiento de cada uno de los elementos que intervienen en el arreglo experimental propuesto. Primero se conceptualiza lo que es la óptica, un rayo de luz y los fenómenos que ocurren en ella al contacto con superficies reflectoras (reflexión de luz). Más adelante se describen algunos elementos ópticos, tales como espejos y lentes. También es mencionado el medio por donde la luz se propagará, en este caso, la fibra óptica, así como su estructura, propiedades y características de los diferentes tipos de fibra. Al final se mencionan los dispositivos diodo láser y fotodiodo, elementos que permiten el desarrollo del sensor, así como sus características más sobresalientes.

3.1 Óptica

La óptica es la ciencia que estudia los orígenes, la propagación y la detección de la luz. En esta definición se entiende por luz no solo la radiación electromagnética visible, sino también la infrarroja y la ultravioleta. [22]

La óptica puede dividirse en tres partes, cada una de las cuales requiere un tratamiento teórico esencialmente diferente. Estas son:

- a) Óptica geométrica, que estudia por el método de los rayos luminosos.
- b) Óptica física, que trata de la naturaleza de la luz desde punto de vista de la teoría de ondas.
- c) Óptica cuántica, relacionada con las interacciones entre la luz y las partículas atómicas y cuyo estudio preciso requiere el empleo de los métodos de la mecánica cuántica. [23]

El rayo luminoso indica la dirección del flujo de energía en el haz luminoso. Las leyes de reflexión y refracción, visualizadas en las Figuras 3.2 y 3.3, constituyen la base de toda la óptica geométrica.

- Ley de Reflexión: *Establece que el rayo reflejado se encuentra en el plano de incidencia y forma un ángulo de reflexión que es igual al ángulo de incidencia.*

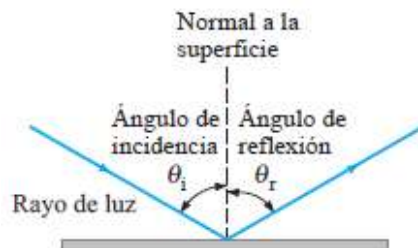


Figura 3.2 Comportamiento del haz de luz en la Reflexión. [25]

$$\theta_i = \theta_r,$$

(ecuación 3.2)

donde:

θ_i = ángulo de incidencia

θ_r = ángulo de reflexión

Cuando un rayo incide sobre la superficie de separación de dos medios transparentes, en lo que la velocidad de la luz es sensiblemente diferente, se divide en un rayo reflejado y otro refractado.

- Ley de Refracción: *Es el cambio que experimenta la dirección de propagación de la luz cuando atraviesa oblicuamente la superficie de separación de dos medios transparentes de distinta naturaleza.*

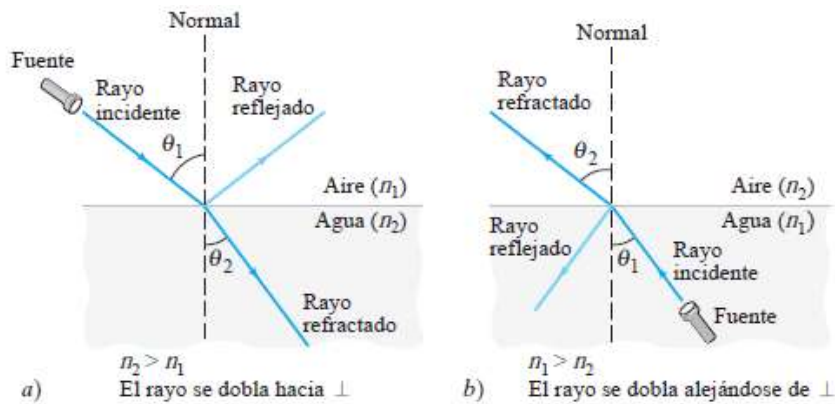


Figura 3.3 Comportamiento de la luz en la Refracción. [25]

donde:

θ_1 = ángulo de incidencia

θ_2 = ángulo de refracción [25]

En una superficie refractora podemos definir los siguientes parámetros:

- Centro de curvatura*: es el centro de una esfera imaginaria que contiene a la superficie refractora.
- Radio de curvatura*: es la distancia de la superficie refractora al centro de curvatura.
- Vértice*: es un punto sobre la superficie refractora, en el centro de su abertura libre. Esta abertura se supone de forma circular.
- Eje óptico*: es una línea recta imaginaria que pasa por el vértice y el centro de curvatura.

A una superficie esférica pueden llegar rayos luminosos con muy diversas orientaciones. Según su dirección, los rayos que inciden en una superficie esférica se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- 1) *Rayo meridional*: es cualquier rayo que junto con el eje óptico definen un plano al que llamamos meridional. En este caso la normal a la superficie y el rayo refractado están también en el plano meridional.
- 2) *Rayo oblicuo*: es cualquier rayo que no sea meridional. En este caso el rayo ni tiene un punto común con el eje óptico ni es paralelo a él.
- 3) *Rayo paraxial*: es un rayo meridional cuyo ángulo con respecto al eje óptico es muy pequeño (paraxial significa cerca del eje). [22]

3.2 Espejos

Un espejo es una superficie pulimentada que refleja toda la luz que recibe. Según la forma geométrica de su superficie, ver Figura 3.4, podemos clasificarlos en dos tipos: planos y esféricos.

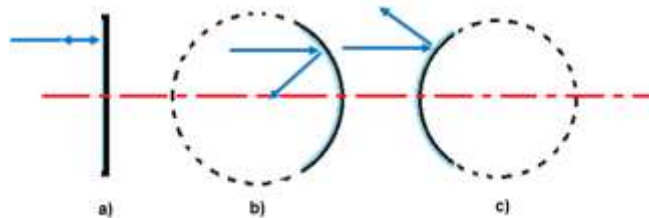


Figura 3.4 a) Espejo plano b) Espejo cóncavo c) Espejo convexo. [26]

3.2.1 Espejo plano

Para comprender el proceso de la formación de imágenes en un espejo plano, consideremos primero la imagen formada por los rayos emitidos. El rayo luminoso es reflejado sobre sí mismo por el espejo. Puesto que la luz reflejada parece haber recorrido la misma distancia que la luz incidente, la imagen se forma a una distancia igual, detrás del espejo, cuando se observa a lo largo de la normal a la superficie de reflexión. Cuando la luz reflejada se ve en el espejo desde cierto ángulo, la conclusión es la misma: la distancia a la imagen es igual a la distancia al objeto. Esto es cierto porque el ángulo θ es igual al ángulo θ' en la Figura 3.2. Por ello, es posible decir que: Para un

espejo plano, la distancia al objeto es igual en magnitud a la distancia a la imagen.

Las imágenes formadas por el espejo plano son producto de la reflexión de objetos reales. Las imágenes en sí mismas no son reales porque la luz no pasa a través de ellas. Esas imágenes que ante nuestros ojos parecen estar formadas por rayos de luz, pero en realidad no existen, se denominan *imágenes virtuales*. En cambio, una *imagen real* es aquella formada por rayos de luz verdaderos.

Una imagen virtual es la que parece estar formada por luz que proviene de la imagen, pero que en realidad no es atravesada por ningún rayo de luz. Una imagen real está formada por rayos de luz reales que la atraviesan. Las imágenes reales se pueden proyectar en una pantalla. Puesto que las imágenes virtuales no se forman por rayos de luz reales, no se pueden proyectar en una pantalla. [26]

En un espejo plano las imágenes que se forman se caracterizan por:

- Se encuentran a la misma distancia.
- Son de igual tamaño que el objeto.
- Son simétricas respecto al eje.

Cuando la imagen es formada por líneas imaginarias, se dice que la imagen es virtual.

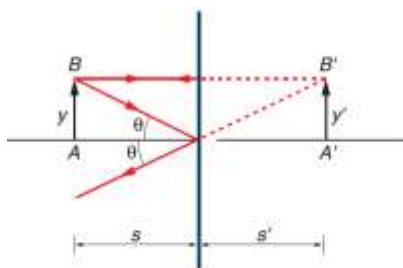


Figura 3.5 Trazo de rayos en un espejo plano. [26]

3.2.2 Espejos esféricos

La mayoría de los espejos curvos usados en aplicaciones prácticas son esféricos. Un *espejo esférico* es el que puede considerarse como una parte de una esfera reflejante. Los dos tipos de espejos esféricos se ilustran en la Figura 3.6 y 3.7. Si el interior de la superficie esférica es la superficie reflejante, se dice que el espejo es *cóncavo*. Si la porción exterior es la superficie reflejante, el espejo es *convexo*. En cualquier caso, R es el *radio de curvatura* y C es el *centro de curvatura* de los espejos.

3.2.3 Espejo cóncavo

Es un espejo con una superficie esférica y que se caracteriza por:

- Cuando inciden sobre él rayos paralelos, los haces reflejados convergen en un punto llamado *foco* del espejo.
- El foco se sitúa a la mitad del radio de curvatura.

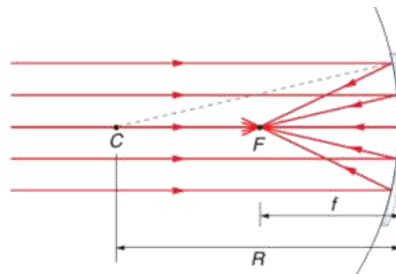


Figura 3.6 Trazo de rayos en un espejo cóncavo. [26]

3.2.4 Espejo convexo

Es un espejo con una superficie esférica y que se caracteriza por:

- Cuando inciden sobre él rayos paralelos, los haces reflejados parecen divergir en un punto, llamado *foco* del espejo.
- El foco se sitúa a la mitad del radio de curvatura.

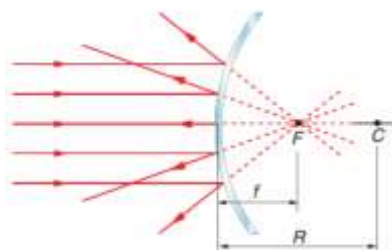


Figura 3.7 Trazo de rayos de espejo convexo. [26]

3.2.5 Formación de imágenes en espejos

El mejor método para comprender la formación de imágenes por medio de espejos es a través de la óptica geométrica, o trazado de rayos. Este método consiste en considerar la reflexión de unos cuantos rayos divergentes a partir de algún punto de un objeto que no se encuentre en el eje del espejo. El punto en el que se intersectarán todos esos rayos reflejados determina la ubicación de la imagen. Se analizan tres rayos cuyas trayectorias pueden trazarse fácilmente. Cada uno de los rayos se ilustra, tanto para un espejo convergente (cóncavo) y como para uno divergente (convexo). [26]

- Un rayo paralelo al eje del espejo pasa a través del punto focal de un espejo cóncavo o parece provenir del punto focal de un espejo convexo.

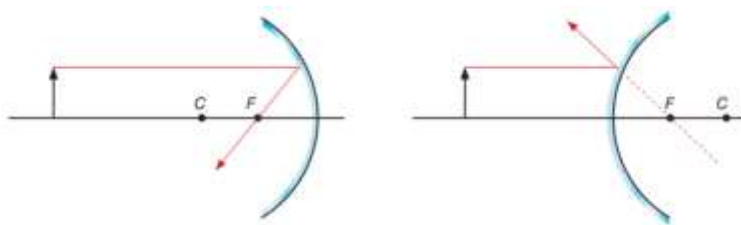


Figura 3.8 a) Espejo cóncavo. b) Espejo convexo. [26]

- Un rayo que pasa por el punto focal de un espejo cóncavo o que se dirige al punto focal de un espejo convexo se refleja paralelamente al eje del espejo.

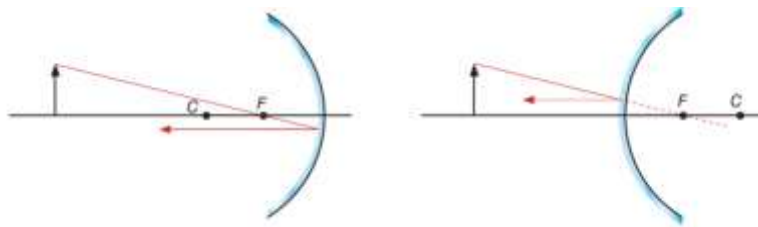


Figura 3.9 a) Espejo cóncavo. b) Espejo convexo. [26]

- Un rayo que avanza a lo largo del radio del espejo es reflejado a lo largo de su trayectoria original.

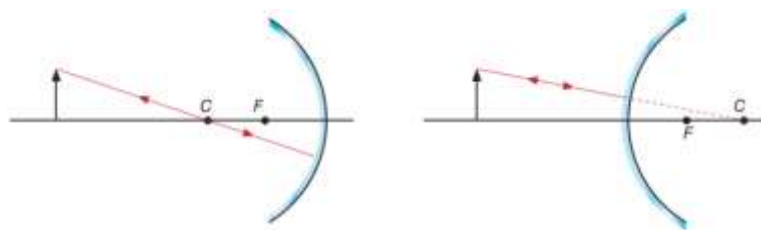


Figura 3.10 a) Espejo cóncavo. b) Espejo convexo. [26]

En una situación específica, solo se necesitan dos de estos tres rayos para ubicar la imagen de un punto. Si se eligen los rayos que proceden de un punto extremo del objeto, la imagen restante se puede completar generalmente por simetría. En las Figuras 3.8, 3.9, 3.10, las líneas discontinuas se usan para identificar los rayos y las imágenes virtuales.

3.2.6 Visualización de imágenes en diferentes situaciones en un espejo cóncavo.

- En la Figura 3.11a se ilustra la imagen formada por un objeto colocado fuera del centro de curvatura del espejo. Observe que la imagen se ha formado entre el punto focal F y el centro de curvatura C . En este caso, la imagen es *real*, *invertida* y *más pequeña* que el objeto.
- En la Figura 3.11b el objeto se ubica en el centro de curvatura C . El espejo cóncavo forma una imagen en el centro de curvatura que es *real*, *invertida* y *del mismo tamaño* que el objeto.

- En la Figura 3.11c el objeto se ubica entre C y F . Al trazar los rayos correspondientes se observa que la imagen se forma más allá del centro de curvatura. Dicha imagen es *real*, *invertida* y *mayor* que el objeto.
- En la Figura 3.11d el objeto se encuentra en el punto focal F , todos los rayos reflejados son paralelos, por el hecho de los rayos reflejados jamás se intersectarán, por más que se prolonguen en cualquier dirección, no se formará ninguna imagen (la imagen es infinita). [26]

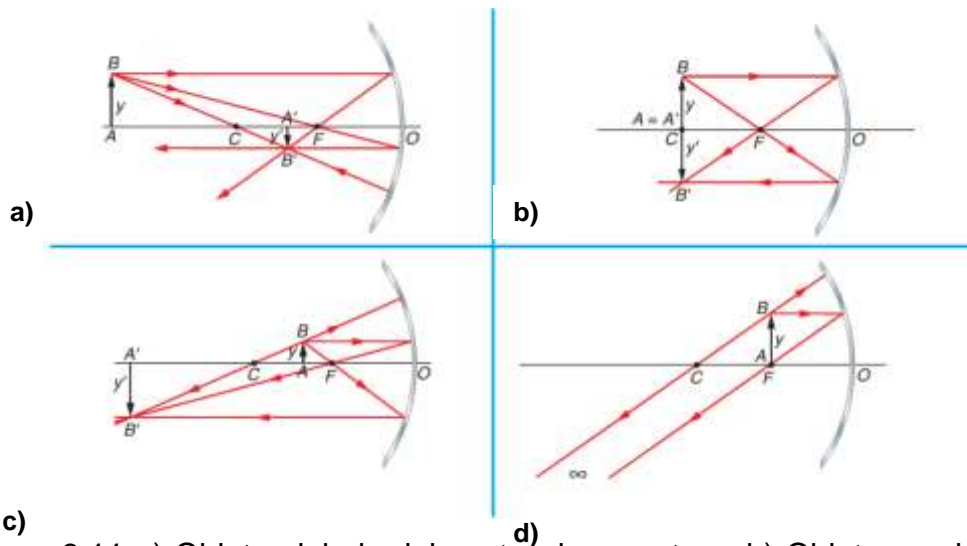


Figura 3.11 a) Objeto alejado del centro de curvatura. b) Objeto en el centro de curvatura. c) Objeto entre el centro de curvatura y el foco. d) Objeto en el foco. [26]

- Cuando el objeto se localiza dentro del punto focal F , en la Figura 3.12, parece que la imagen está detrás del espejo, eso puede advertirse si se prolongan los rayos reflejados hasta un punto situado detrás del espejo. Por tanto, la imagen es *virtual*, *alargada* y *no invertida*.

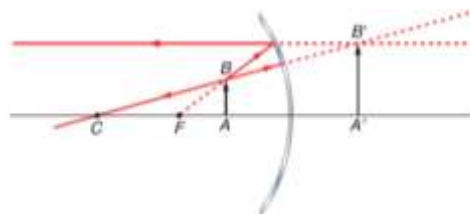


Figura 3.12 Objeto dentro el foco. [26]

3.2.7 Visualización de imagen en situación de un espejo convexo

Por otra parte, Figura 3.13, todas las imágenes que se forman en espejos convexos tienen las mismas características, se tratan de imágenes *virtuales*, *no invertidas* y *tamaño reducido*. El resultado de esto es que ofrecen un campo de visión más amplio y explica muchos de los usos de los espejos convexos.

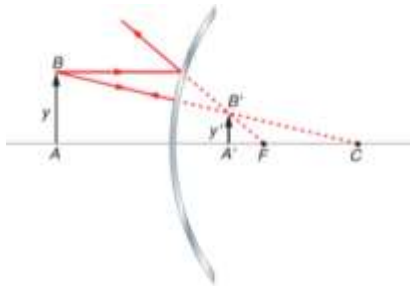


Figura 2.13 Trazo de rayos en un espejo convexo. [26]

Antes de enumerar las ecuaciones de espejos, es conveniente repasar el significado de los símbolos, ver Figura 3.14.

- R = radio de curvatura (positivo para cóncavos y negativo para convexos).
- f = distancia focal (positivo para cóncavos y negativo para convexos).
- p = distancia al objeto (positivo para objeto real y negativo imagen virtual).
- q = distancia a la imagen (positivo para imágenes reales y negativo para virtuales).
- y = tamaño del objeto (positivo si está de pie y negativo si aparece invertido).
- y' = tamaño de la imagen (positivo si está de pie y negativo si aparece invertido).
- M = amplificación (positivo tanto si está de pie o invertida). [26]

Con los términos se obtiene la relación

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}.$$

(ecuación 3.3)

Esta relación se conoce como la *ecuación del espejo*. A menudo se escribe en términos de la longitud focal f del espejo, en lugar de hacerlo respecto al radio de curvatura. Si

$$f = \frac{R}{2},$$

(ecuación 3.4)

podemos volver a escribir la ecuación anterior como:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}.$$

(ecuación 3.5)

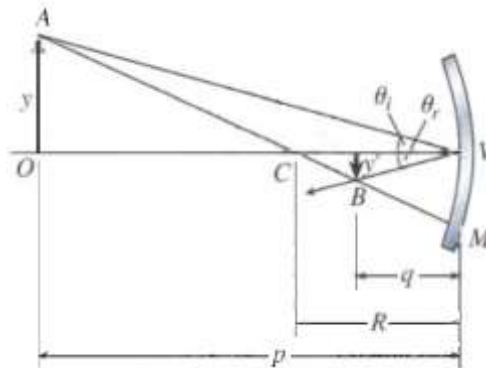


Figura 3.14 Deducción de la ecuación del espejo. [26]

3.3 Lentes

Sin duda el sistema óptico más usado es la lente y eso sin contar que vemos el mundo a través de un par de ellas. En términos generales, una lente es un elemento óptico refractor (es decir, una discontinuidad en el medio dominante) que reconfigura a la distribución de la energía emitida. Esto aplica a los rayos UV, a las ondas cortas, a IR, a las microondas, etc. [27]

Una lente es un elemento óptico limitado por dos superficies, en donde al menos una de ella es esférica. Una clasificación de las lentes puede ser:

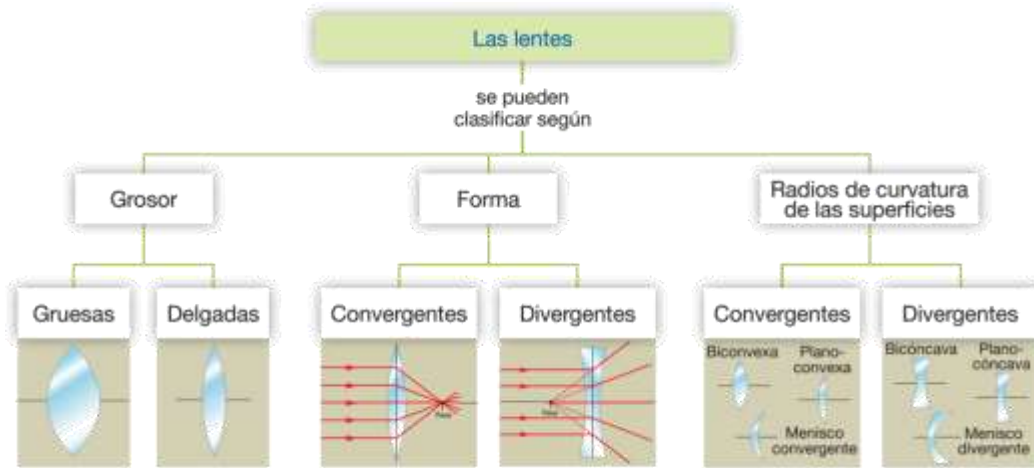


Figura 3.15 Clasificación de las lentes. [28]

Para nuestro estudio se abordará la clasificación de las lentes de grosor delgado y de forma convergente y divergente.

Una lente delgada es un pedazo de vidrio o de plástico, pulido de tal manera que cada una de sus dos superficies refractoras es un segmento ya sea de una esfera o de un plano. Las lentes se utilizan por lo común para formar imágenes por refracción en instrumentos ópticos, como cámaras, telescopios y microscopios, por ejemplo. La ecuación que correlaciona las distancias al objeto y a la imagen en el caso de una lente es prácticamente idéntica a la ecuación del espejo ya deducida, y el método que se utiliza para deducirla también es similar. [28]

Una lente delgada generalmente es circular y sus dos caras son porciones de una esfera (aunque también son posibles superficies cilíndricas). Las dos caras pueden ser cóncavas, convexas o planas. En la Figura 3.16 se presentan varios tipos, en sección transversal.

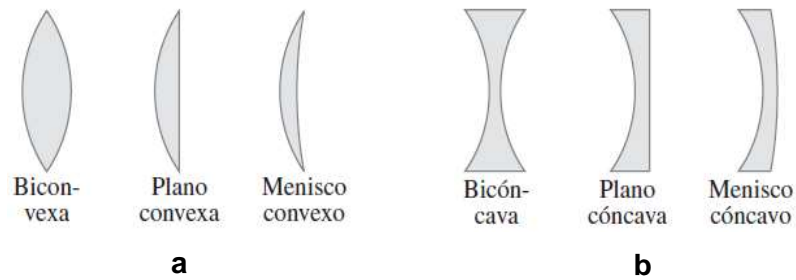


Figura 3.16. a) Lentes delgadas convergentes. b) Lentes delgadas divergentes. [25]

La lente está hecha de un material como vidrio o plástico transparente, con índice de refracción mayor que el del aire exterior. El *eje* de una lente es una línea recta que pasa a través del centro de la lente y es perpendicular a sus dos superficies visto en la Figura 3.17. A partir de la ley de Snell, se puede ver que cada rayo se dobla hacia el eje cuando entra a la lente y de nuevo cuando sale de la lente en la superficie posterior (las líneas punteadas en la Figura 3.17, que indican las normales a cada superficie para el rayo superior). Si los rayos paralelos al eje inciden sobre una lente delgada, se enfocarán en un punto llamado *punto focal*, F . Tomando en cuenta si el diámetro de la lente es pequeño en comparación con los radios de curvatura de las dos superficies de la lente. Este criterio lo satisface una *lente delgada*, que es muy delgada en comparación con su diámetro.

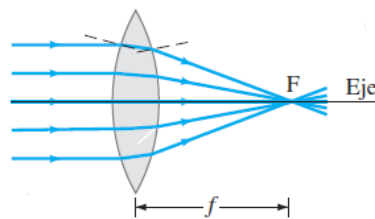


Figura 3.17 Rayos paralelos llegan a un foco por medio de una lente delgada convergente. [29]

La distancia del punto focal desde el centro de la lente se llama *distancia focal* o *longitud focal*, f . La distancia focal es la misma en ambos lados de la

lente, incluso si las curvaturas de las dos superficies de la lente son diferentes. [29]

3.3.1 Lente convergente

En una lente en donde es más gruesa en el centro que en los bordes hará que los rayos paralelos converjan en un punto, y se llama lente convergente como se muestra en la Figura 3.17. Además los rayos que llegan paralelos al eje óptico convergen en un punto, denominado foco imagen, o simplemente foco (algo muy similar al espejo cóncavo).

3.3.2 Lente divergente

Las lentes que son más delgadas en el centro que en los bordes se llaman lente divergentes porque hacen que la luz paralela diverja, como se muestra en la Figura 3.18. El punto focal de una lente divergente se define como aquel punto desde el cual los rayos refractados, que se originan de los rayos incidentes paralelos, parecen surgir (prolongaciones de los rayos que se cortan en un punto) como se observa en la Figura 3.18, y la distancia desde F hasta la lente se llama *distancia focal, f*, similar a un espejo convexo. [29]

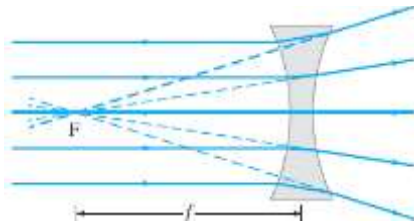


Figura 2.18 Lente divergente. [29]

3.3.3 Lente cilíndrica

Además de las lentes esféricas existen las lentes cilíndricas representadas por el corte o segmento vertical de un cilindro, ver Figura 3.19. La característica de estas lentes es que forman una imagen lineal, ya que los rayos que las atraviesan siguiendo un plano que pase por el eje de la lente

no se desvían, mientras que los rayos que siguen un plano perpendicular a dicho eje tienen una refracción máxima. Así que, a diferencia de las lentes esféricas que pueden corregir la refracción en todos los meridianos. [30]

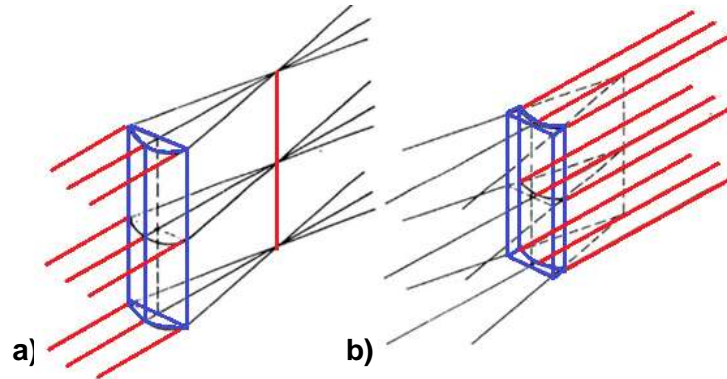


Figura 3.19 a) Lente cilíndrica convergente. b) Lente cilíndrica divergente.

[30]

Una lente cilíndrica tiene simetría de revolución alrededor de un eje perpendicular al eje óptico que se denomina eje del cilindro. Por lo que, la lente sólo tiene potencia a lo largo del meridiano perpendicular a su eje, mientras que en el meridiano paralelo al eje su potencia es nula y su distancia focal es infinita. Por lo tanto, los rayos provenientes del infinito, en lugar de enfocarse en un punto, se enfocaran en un segmento al que se denomina *línea focal de la lente*, como es visto en la Figura 3.20. [31]

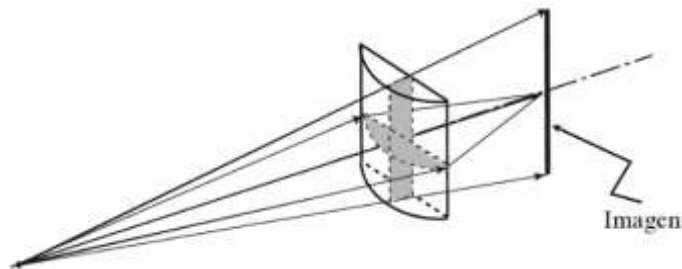


Figura 3.20 Una lente cilíndrica positiva forma la imagen de un punto axial sólo en una dirección. [31]

3.4 Fibras ópticas

La fibra óptica se utiliza como medio de transmisión de luz a través de un filamento transparente de vidrio o algún material plástico de geometría cilíndrica con un diámetro común de 125 μm . En telecomunicaciones se utiliza los diodos emisores de luz (LED) o diodos láser (LD) para enviar datos a través de la fibra óptica, presentando muchas ventajas con respecto a los cables de cobre tradicionales principalmente por sus propiedades intrínsecas como: gran ancho de banda (decenas de GHz), la baja atenuación que presentan, no depende de la frecuencia de conmutación, al ser un material dieléctrico es inmune a la interferencia electromagnética, dimensión y peso más reducida que los medios preexistentes, la materia prima utilizada para su construcción es muy abundante en la naturaleza, múltiples canales de información en un solo cable de fibra óptica, gran flexibilidad, la intrusión en una fibra óptica es fácilmente detectable, etc. La mayoría de las aplicaciones de la fibra óptica está destinada al área de comunicaciones sin embargo hoy en día la investigación ha encontrado numerosas aplicaciones de la fibra óptica en diferentes áreas (medicina, arqueología, iluminación, sensores, holografía, etc). Las diferentes aplicaciones actuales de las fibras ópticas se basan siempre en una o más de sus propiedades físicas, ya sean de carácter óptico, mecánico o químico. [32] [33]

3.4.1 Estructura básica de la fibra óptica

La estructura básica de la fibra óptica, es vista en la Figura 3.21, consiste de un núcleo de vidrio o plástico por donde se propaga la energía luminosa y de un revestimiento coaxial al núcleo, necesario para que se produzca el mecanismo de múltiples reflexiones internas totales, debido a que este tiene un índice de refracción n_2 menor que el del núcleo n_1 . La fibra óptica también posee un recubrimiento plástico que la protege de agentes externos que la pueden dañar. El diámetro del núcleo depende del tipo de fibra óptica no

siendo mayor a $100 \mu\text{m}$, por otro lado el diámetro del revestimiento y recubrimiento pueden ser constantes sin importar el tipo de fibra con un valor de 125 a $140 \mu\text{m}$ y 250 a $900 \mu\text{m}$ respectivamente. [33]

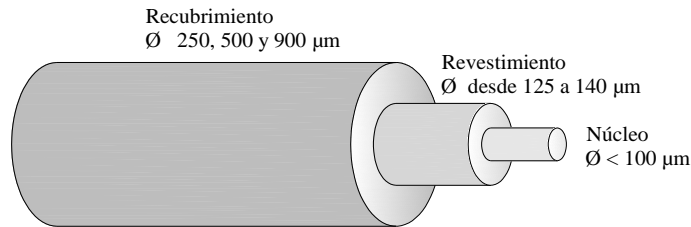


Figura 3.21 Partes básicas de la fibra óptica. [34]

3.4.2 Propagación de la luz en la fibra óptica

Los principios básicos de la propagación de la luz a través de la fibra óptica se explican aplicando las leyes de la óptica geométrica. Si se quiere entender rigurosamente el mecanismo de propagación en el interior de la fibra, hay que recurrir a la resolución de las ecuaciones del campo electromagnético; es decir, las ecuaciones de Maxwell. Considerando un rayo luminoso como una onda, que incide sobre una superficie que separa a dos medios (frontera o interfaz) con índices de refracción diferente n_1 y n_2 , la onda se divide en dos, una se refleja con un ángulo igual al ángulo formado por la onda de incidencia θ_1 con respecto a la normal de la frontera y la segunda se refracta pasando al segundo medio con un ángulo diferente al ángulo de incidencia respecto a la normal de la frontera tal como se aprecia en la Figura 3.22.

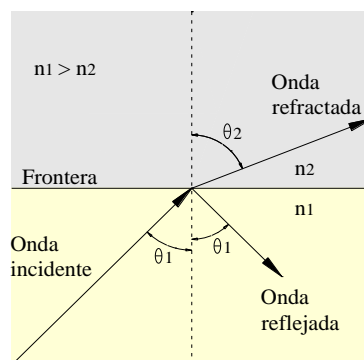


Figura 3.22 Reflexión y refracción de una onda incidente. [34]

El ángulo formado por la onda refractada con la normal de la frontera es θ_2 y se puede calcular a partir de la *Ley de Snell* (o de refracción), esta ley establece:

Los índices de refracción están en razón inversa a los senos de los ángulos que forma la normal a la superficie de separación con las respectivas ondas.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}.$$

(ecuación 3.6)

Escrita de otra manera:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2.$$

(ecuación 3.7)

De la ecuación 3.7 podemos deducir que si $n_1 > n_2$ entonces los ángulos cumplirán la condición $\theta_2 > \theta_1$, esto significa que al aumentar gradualmente el ángulo de la onda de incidencia, la onda refractada se acercara a la frontera. El ángulo del rayo de incidencia (θ_1) en el cual el ángulo de la onda refractada (θ_2) forma un ángulo de 90° con la normal de la frontera se le denomina ángulo límite.

Si un haz luminoso incide sobre dicha superficie con un ángulo mayor a igual al ángulo límite entonces las ondas se reflejaran en su totalidad y no habrá ondas refractadas, a esta característica se le conoce principio de reflexión total y es el que hace posible la propagación de la luz en el núcleo de la fibra óptica.

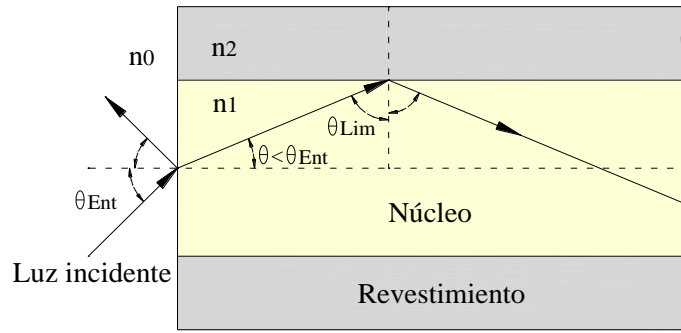


Figura 2.23 Ángulo límite de entrada. [34]

Considerando la estructura de la fibra óptica en la Figura 3.23 se observa que se involucran tres índices de refracción, del aire (n_0), del núcleo (n_1) y del revestimiento (n_2); por lo tanto, si un haz de luz incide en la entrada de la fibra óptica se refractara a través del núcleo con un ángulo menor que el inicial dirigiéndose a la interfaz núcleo-revestimiento, si el ángulo que forma con la normal de esta es mayor o igual al ángulo límite entonces habrá múltiples reflexiones internas totales. Para que esto ocurra es necesario que el ángulo que forma el rayo de entrada con el eje de la fibra óptica cumpla con la condición del ángulo límite de entrada. Para calcular este ángulo límite de entrada (θ_{Ent}) se utiliza nuevamente la ley de Snell.

$$\theta_{Ent} = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \times \cos \theta_{lim} \right) = \sin^{-1} \left[\frac{n_1}{n_2} \times \cos \left(\sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \right) \right],$$

(ecuación 3.8)

donde θ_{Lim} es el ángulo límite en el interior de la fibra óptica. [34]

3.4.3 Abertura numérica (AN)

La apertura numérica es el rango de luz que un sistema óptico puede aceptar. En la fibra óptica, al ingresar la luz en el núcleo con un ángulo menor o igual al ángulo límite de entrada, formara un cono de luz, mientras más grande sea el ángulo que forma con el eje de la fibra óptica mayor

cantidad de energía luminosa podrá transmitirse, lo que ocasiona múltiples reflexiones internas totales dentro del núcleo de la fibra óptica. A partir del valor de la abertura numérica de la fibra óptica se puede saber el ángulo sólido del cono de luz y la cantidad de energía que podrá transmitirse.

Aplicando nuevamente la ley de Snell se obtiene la abertura numérica como:

$$AN = n_0 \sin \theta_{Lim} = \sin \theta_{Lim} ,$$

(ecuación 3.9)

esta ecuación se puede escribir de la siguiente manera:

$$AN = \sqrt{n^2_{núcleo} - n^2_{recubrimiento}} .$$

(ecuación 3.10)

De la ecuación 3.10, se concluye que la abertura numérica depende exclusivamente de los índices de refracción de la fibra óptica y que el índice de refracción del núcleo debe ser mayor que el índice de refracción del revestimiento. Cuanto mayor sea la diferencia de los índices de refracción mayor será la cantidad de energía luminosa que se podrá transmitir a través de la fibra óptica. [34]

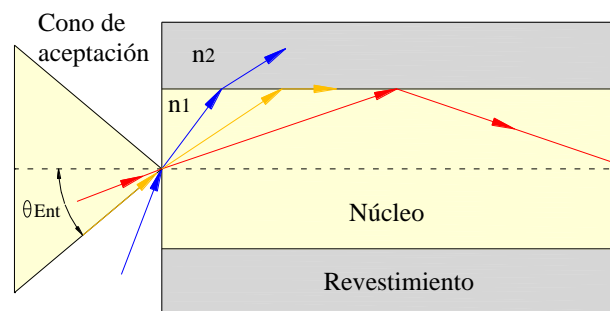


Figura 3.24 Cono de aceptación de luz. [34]

3.4.4 Tipos de fibra óptica

La fibra óptica se puede clasificar de diferentes maneras, como puede ser vista en la Figura 3.25, ya sea por la forma de propagación de la luz en el núcleo de la fibra, por los materiales utilizados para su construcción o por el índice de refracción, en base a lo mencionado anteriormente, se presenta a continuación una clasificación general de la fibra óptica.

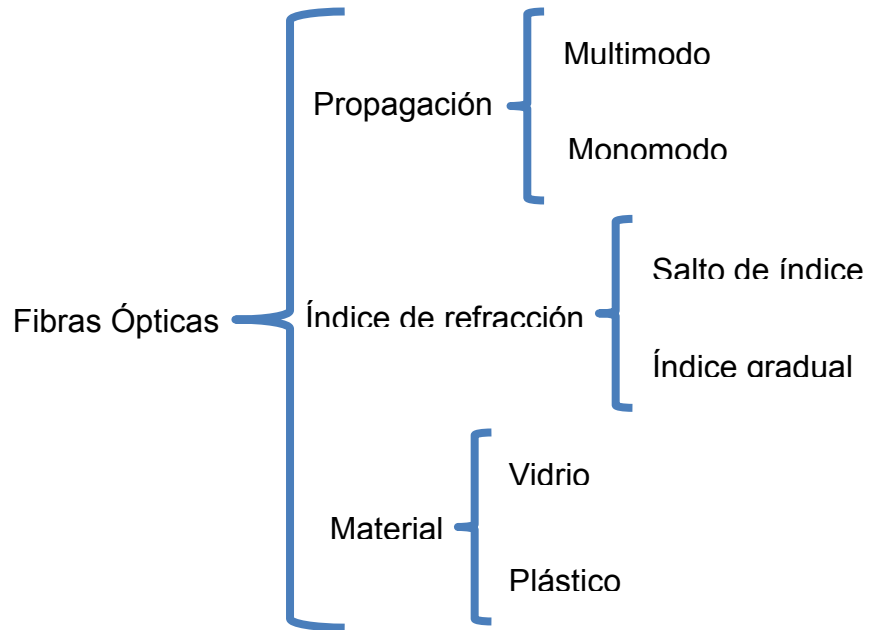


Figura 3.25 Clasificación general de las fibras ópticas.

Se describen más adelante las fibras ópticas comercialmente conocidas de acuerdo a la clasificación expuesta anteriormente.

3.4.5 Fibras multimodo con salto de índice

Están construidas con un índice de refracción constante en todo su núcleo al igual que su revestimiento. En este tipo de fibras ópticas se pueden transmitir diferentes modos de propagación aumentando con ello la cantidad de energía emitida. Al conducir por su núcleo diferentes modos de propagación estos se transmiten a velocidades diferentes llegando al extremo receptor desfasados es decir en tiempos diferentes, esto ocasiona un

ensanchamiento del pulso original reduciendo el ancho de banda. Esta característica no la hace la más adecuada para usos en comunicaciones, reservando su uso en aplicaciones donde la cantidad de energía transportada por ella es más importante. [35]

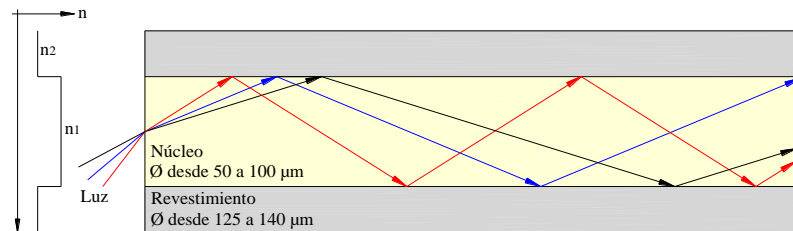


Figura 3.26 Modos de propagación de la luz en una fibra multimodo con salto de índice. [35]

3.4.6 Fibras multimodo con índice gradual

El índice de refracción en su núcleo es variable siendo mayor en el centro y disminuyendo gradualmente hacia la frontera; mientras que el índice de refracción en el revestimiento es constante. Al igual que la fibra multimodo con salto de índice, estas también pueden conducir por su núcleo diferentes modos de propagación de las ondas. Debido a que su índice de refracción en el núcleo es variable, la velocidad de las ondas en el centro será menor a las que se propagan por los extremos. Las ondas que se propagan por los extremos recorren una mayor longitud que las que se propagan por el núcleo, con lo que la mayor longitud que recorren estas se compensa con la mayor velocidad permitiendo así que los diferentes modos de propagación de la luz emitidos en la entrada de la fibra lleguen casi iguales en el extremo receptor de la fibra óptica, resultando en un menor ensanchamiento de la señal original, lo que posibilita el aumento del ancho de banda. [35]

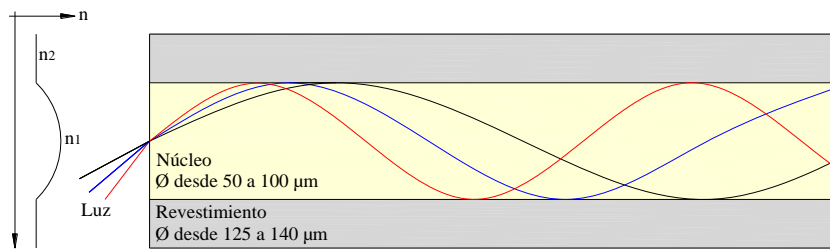


Figura 3.27 Modos de propagación de la luz en una fibra multimodo con índice gradual. [35]

3.4.7 Fibras monomodo

Su construcción es similar a las fibras multimodo con salto de índice, diferenciándose únicamente en un menor diámetro del núcleo. Al disminuir el diámetro del núcleo a valores menores o iguales a 8 o 10 μm se consigue que la frecuencia de corte normalizada (V) esto es el parámetro V , que es un número adimensional que determina cuantos modos en una fibra pueda soportar.

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot AN,$$

(ecuación 3.11)

donde:

a = tamaño del núcleo de la fibra.

λ = longitud de onda.

n = índice de refracción

Si se trata de una fibra monomodo o multimodo, el total de número de modos es dado por:

$$M = \frac{V^2}{2},$$

(ecuación 3.12)

así que para $M \leq 2.405$ será monomodo, mientras $M > 2.405$ es multimodo.

Conseguindo que la ecuación de propagación de la onda (resultado de las ecuaciones de Maxwell) tenga solamente una solución lo que significa que la fibra óptica transmitirá únicamente un modo de propagación de la onda. Al transmitir una señal con un solo modo dentro de la fibra óptica esta no presentara un ensanchamiento en el extremo receptor, haciendo de este tipo de fibra la más utilizada para comunicaciones ya que presenta un gran ancho de banda con respecto a las fibras multimodo. [35]

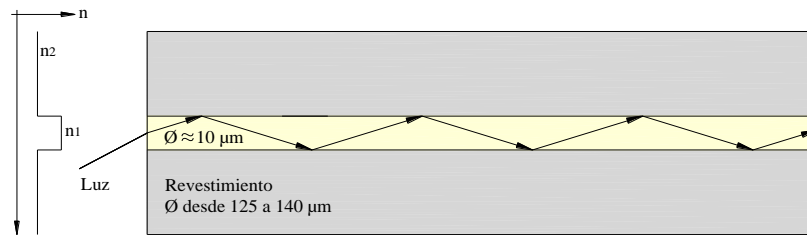


Figura 3.28 Modo de propagación de la luz en una fibra monomodo. [35]

3.4.8 Fibras ópticas de plástico

Con el advenimiento de las nuevas aplicaciones, como resultado de los avances tecnológicos, las fibras ópticas de plástico (POFs), actualmente compiten en los enlaces de comunicaciones los alambres de cobre, los cables coaxiales, las fibras ópticas de vidrio y el aire (canales inalámbricos). Las POF se fabrican usando materiales de plástico como poliestireno (PS), policarbonatos (PC) y polimetilmetacrilato (PMMA), estos materiales presentan ventajas de operación en la zona visible del espectro electromagnético en el rango de 520 a 780 nm de longitud de onda. No obstante las pérdidas que presentan en comparación con las fibras de vidrio constituyen su principal desventaja. Esto último explica del porque las fibras de plástico son de aplicación para distancia cortas, típicamente para longitudes de enlaces menor a unos pocos cientos de metros en comparación con los cientos de kilómetros que se logran con fibras ópticas

de vidrio. Sin embargo, las POFs tienen muchas aplicaciones en el control industrial, en sensores de huellas, detección de luz, y en enlaces de datos de distancias pequeñas. Ciertos usuarios han encontrado beneficios en sistemas con POF en comparación con fibras de vidrio o alambre de cobre ofreciendo las siguientes ventajas:

- Componentes sencillos y baratos.
- Peso ligero.
- Operación con luz visible.
- Gran flexibilidad con mayor tolerancia a curvaturas, choques y vibraciones.
- Inmunidad a interferencias electromagnéticas.
- Fácil de manipular y conectar, debido a que sus diámetros son de 1 mm comparados con los 8 o 100 μm para el vidrio.
- Uso de equipos sencillos y baratos.
- Mayor seguridad que las fibras de vidrio por daños a la retina del personal operativo.
- Los trancceptores con POF requieren menos consumo que los de cobre.

Las desventajas son las siguientes:

- Pérdidas elevadas de transmisión.
- Número reducido de proveedores.
- Falta de conocimiento y familiaridad en el diseño e instalación de sistemas con POFs. [36]

3.4.9 Atenuación en la fibra óptica

La atenuación o la pérdida de transmisión de las fibras ópticas han demostrado ser uno de los factores más importantes para lograr su amplia

aceptación en las telecomunicaciones. Como la atenuación determina en gran medida la distancia de transmisión máxima antes de la restauración de la señal, las comunicaciones de fibra óptica se volvieron especialmente atractivas cuando las pérdidas de transmisión de fibras se redujeron por debajo de las de los conductores metálicos (menos de 5 dB km^{-1}). [37]

Es la pérdida de energía óptica cuando la luz viaja a través de la fibra, o la disminución de la potencia de la señal a medida que está se propaga (reducción exponencial respecto a la longitud). Se expresa generalmente en la unidad logarítmica del decibelio por unidad de longitud.

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \right) \text{ [dB]},$$

(ecuación 3.13)

donde:

P_{in} = potencia de entrada.

P_{out} = potencia de salida.

L = longitud de la fibra óptica.

Los mecanismos responsables de la atenuación de la señal en una fibra óptica son numerosos, y se deben a distintos fenómenos. Entre estos fenómenos se encuentran:

- Absorción del material.
- Scattering o esparcimiento del material.
- Pérdidas por curvaturas y microcurvaturas.
- Pérdidas de radiación por acoplamiento de modos.
- Pérdidas debido a fuga de modos.
- Pérdidas por conectores y empalmes. [37]

3.5 Diodo láser

El diodo láser es un láser semiconductor en estado sólido que emplea una combinación de Aluminio, Galio y Arsénico para transformar la energía eléctrica en energía lumínica y trabaja como un diodo eléctrico. El medio activo del diodo es un conjunto de materiales semiconductores dando lugar a una capa de material de tipo P (carga positiva o defecto de electrones o huecos); una capa conductora (unión); y una capa de material tipo N (carga negativa o electrones libres). Un voltaje negativo aplicado a la capa N y uno positivo a la P provoca cambios que llevan a fluir en la unión electrones que liberan energía. En los materiales semiconductores la energía se libera en forma de calor; pero en materiales como el Galio, Aluminio y Arsenio, la energía es liberada en forma de fotones.

El diodo láser se utiliza igual que un diodo LED, es decir, como un diodo P-N polarizado directamente. Sin embargo, aunque su estructura parece similar a la de un LED en lo que respecta a electrones y huecos, no lo es en lo referente a los fotones. La palabra Láser proviene de las siglas en inglés: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, que significa al español: Amplificación de luz por Emisión estimulada de radiación. En la Figura 3.29, muestra la figura de un diodo láser. [38]



Figura 3.29 Diodo láser. [39]

El diodo láser es llevado por un proceso cuántico, donde la luz es emitida por los electrones al pasar de un estado de alta energía a uno de menor energía, estimulando a otros electrones para crear saltos similares. Otra característica importante es que la luz emitida no sólo tiene la misma frecuencia, sino

también la misma fase, a esto se llama coherencia temporal y espacial. Este es el motivo por el cual una luz láser se mantiene enfocado aún a grandes distancias. En la Figura 3.30, se puede observar el haz producido por un diodo láser. Además, los diodos Láser producen una luz coherente.

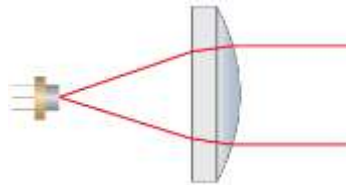


Figura 3.30 Trayectoria de un haz de luz láser a través de una lente planoconvexo. [40]

Las características eléctricas del diodo laser se obtienen de la curva de respuesta óptica del diodo. Esta curva es generada por la potencia de salida en función de la corriente de alimentación. Muestra el punto de operación del láser, la corriente de umbral, región donde se lleva a cabo el cambio del proceso de emisión espontánea a emisión estimulada. En la Figura 3.31, se pueden observar los parámetros eléctricos de la curva de respuesta óptica de un diodo láser. [38]

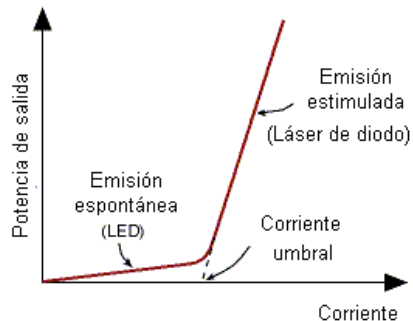


Figura 3.31 Curva característica de la relación entre potencia y corriente del diodo láser. [38]

La sintonización de un diodo láser es un parámetro que permite centrar una longitud de onda transformando la temperatura y la corriente, los cambios de

temperatura afectan directamente a las bandas de energía del semiconductor y por consiguiente el pico de longitud de onda. La Figura 3.32, se muestra las características espectrales de los diodos láser. [38]

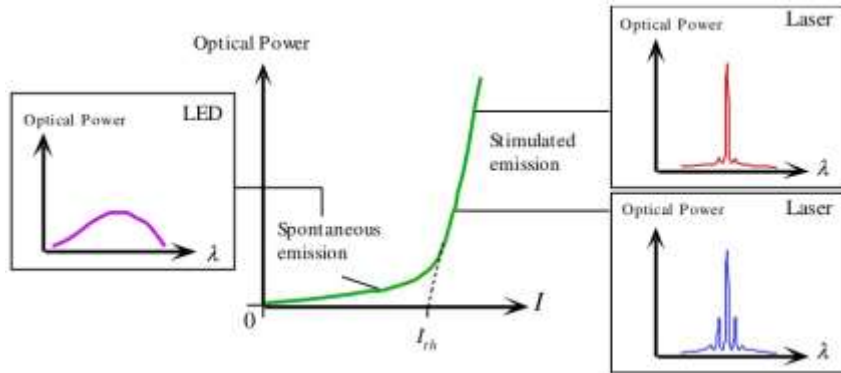


Figura 3.32 Gráficas de las características espectrales del diodo láser. [38]

3.5.1 Propiedades de la emisión láser

- *Monocromaticidad:* Las ondas electromagnéticas de un haz luminoso tienen la misma frecuencia y por lo tanto misma longitud de onda. Se puede considerar luz monocromática a una banda espectral muy reducida.

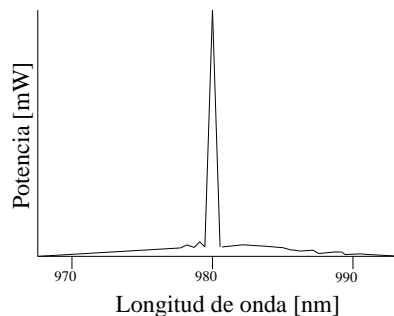


Figura 3.33 Espectro de la emisión láser. [41]

- *Coherencia:* Las ondas electromagnéticas deben de cumplir con la condición de mono-cromaticidad además de estar todas en fase y con igual polarización. La fase se refiere a que todas las ondas emitidas deben tener la misma amplitud y frecuencia en función del tiempo.

Mientras que la polarización significa que todas las ondas electromagnéticas se propagan paralelas a un mismo plano.

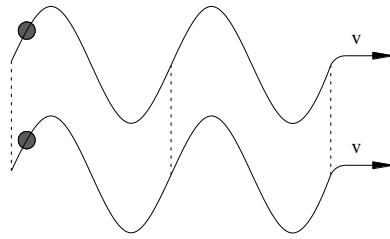


Figura 3.34 Ondas electromagnéticas con las misma fase, frecuencia y polarización. [41]

- *Unidireccionalidad:* Es la propiedad física de un láser de mantener su emisión de luz confinada en un diámetro pequeño, lo que permite que sea transmitida a gran distancia. Esta depende del valor del ángulo de divergencia del haz luminoso que establece su ensanchamiento a mayor distancia.

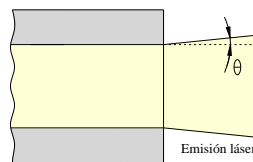


Figura 3.35 Divergencia de un láser. [41]

- *Intensidad luminosa (Brillantez):* Es la potencia luminosa emitida por unidad de superficie de área dentro de un ángulo sólido. La brillantez es el parámetro más importante de un rayo láser y, en general, de cualquier fuente de luz pero con la diferencia de que un rayo láser de poder moderado (algunos milliwatts) tiene una magnitud de brillantez más grande que el de las fuentes convencionales más brillantes; principalmente debido a las propiedades direccionales del rayo láser, una característica explotada en muchas aplicaciones. [41]

3.6 Fotodetector

El fotodetector es responsable de convertir la potencia óptica recibida en una señal eléctrica, generalmente en una corriente que a continuación es amplificada y transformada en un nivel de tensión. Un procesado posterior extrae la información, tras realizar las operaciones necesarias de filtrado, igualación, muestreo, etc. Conviene mencionar que en la actualidad los dispositivos fotodetectores más ampliamente empleados son los basados en semiconductores y, en particular, los fotodiodos. [42]

Un fotodetector es un dispositivo capaz de convertir un flujo de fotones en una magnitud medible. De acuerdo a esta amplia definición, las películas fotográficas o las células de la retina son ejemplos de fotodetectores.

En el ámbito de los sistemas electrónicos, dicha magnitud medible consiste en una corriente o en una tensión. Dependiendo del mecanismo subyacente a su funcionamiento, los fotodetectores se clasifican en dos grupos:

- Detectores térmicos: el material del que se hallan fabricados es calentado por la radiación absorbida, y este calentamiento provoca un cambio en el comportamiento del material, como por ejemplos, modificar su conductividad. A causa de su reducida velocidad de respuesta, las aplicaciones de los detectores térmicos en comunicaciones ópticas y otras áreas de la fotónica son muy limitadas.
- Detectores fotoeléctricos: la absorción de fotones resulta en una transmisión de los electrones presentes en el material hacia niveles de energía superior, donde son susceptible de ser transportados por un campo eléctrico, generando una corriente. Algunos detectores que basan su operación en ese fenómeno, conocido como *fotoefecto*, son las células fotoeléctricas, los fotoconductores, los fotodiodos y los fototransistores.

Las cualidades básicas que un fotodetector debe reunir con el fin de ser apto para su aplicación en los sistemas de comunicaciones ópticas son: [42]

- Elevada sensibilidad
- Capacidad de absorción de radiación a las longitudes de onda de interés (por ejemplo, en las ventanas de transmisión de las fibras)
- Alta velocidad de respuesta
- Comportamiento lineal
- Tensión de alimentación moderada y compatible con los valores propios de los restantes circuitos de comunicaciones
- Tamaño reducido, adaptado al tamaño de las fibras y otros elementos del sistema.
- Estabilidad frente al cambio, en las condiciones ambientales y fiabilidad.

3.6.1 Características de los detectores de luz

Las características más importantes de los detectores de luz son:

1. *Responsividad*. Es una medida de la eficiencia de conversión un fotodetector. Es la relación de la corriente de salida de un fotodiodo entre la potencia óptica que le entra, y tiene unidades de amperes/watt. En general, se menciona la responsividad a una determinada longitud de onda o frecuencia.
2. *Corriente oscura*. Es la corriente de reposos que pasa por un fotodiodo cuando no hay entrada luminosa. Se debe a portadores generados térmicamente en el diodo.
3. *Tiempo de tránsito*. Es el tiempo que tarda un portador inducido por la luz en cruzar la región de agotamiento. Este parámetro determina la máxima frecuencia posible de bits con determinado fotodiodo.
4. *Respuesta espectral*. Es el intervalo de longitudes de onda que se puede usar con determinado fotodiodo. En general, la respuesta espectral relativa se grafica en función de la longitud o frecuencia. La Figura 3.36

es un ejemplo ilustrativo de una curva de respuesta espectral. Se puede ver que este fotodiodo en particular absorbe con mayor eficiencia la energía dentro del intervalo de 800 a 820 nm.

5. *Sensibilidad a la luz.* En esencia, esta sensibilidad es la potencia óptica mínima que puede recibir un detector para producir una señal eléctrica útil de salida. La sensibilidad a la luz se acostumbra mencionar para determinada longitud de onda, ya sea en dBm o en dBμ. [43]

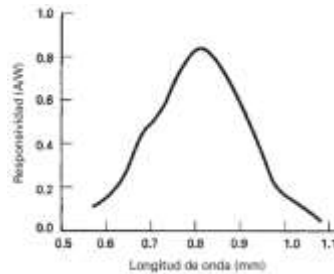


Figura 3.36 Curva espectral de respuesta de un fotodiodo. [43]

3.6.2 Fotodiodo

Es un fotodetector constituido por una unión $P-N$, como en otros detectores ópticos basados en semiconductores, cada fotón absorbido por un fotodiodo origina un par electrón-hueco. No obstante, y aunque los fotones pueden ser absorbidos en cualquier parte del material, únicamente los pares electrón-hueco generados en la región de desdoblamiento o en sus proximidades, desde donde tienen la posibilidad de difundirse hacia la región de desdoblamiento antes de experimentar una recombinación, contribuyen al proceso de detección. La razón es que sólo en la región de desdoblamiento existe un campo eléctrico capaz de transportar los portadores en una dirección concreta: los electrones son arrastrados hacia la zona n y los huecos hacia la p . Este transporte de portadores se exterioriza y aprecia por medio del cambio de las magnitudes eléctricas (corriente y/o tensión) en los bornes del fotodiodo. A continuación son mencionados dos parámetros que se encuentran en estos dispositivos.

Eficiencia cuántica η , que se define como el cociente entre el número de electrones generados y el número de fotones incidentes sobre su superficie. Su valor exacto, siempre entre cero y uno, depende del tipo de material y de la longitud de onda de operación, a través del coeficiente de absorción, así como de la configuración física del fotodetector. Por ejemplo, para longitudes de onda por encima de la de corte para el material del que se halla fabricado, la eficiencia cuántica de un fotodiodo es nula. La Figura 3.38, donde se muestra la eficiencia cuántica de fotodiodos fabricados con diversos materiales, permite ilustrar este hecho.

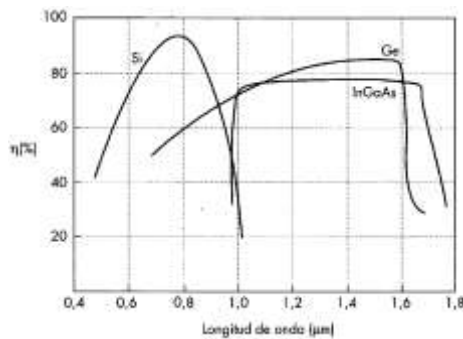


Figura 3.37 Eficiencia cuántica de fotodiodo que utilizan diferentes materiales semiconductores: silicio, germanio y arseniuro de galio e indio. [42]

Respuesta de un fotodiodo \mathfrak{R} que es un parámetro característico de un fotodetector que relaciona, la potencia incidente sobre el mismo, P , con la corriente generada, I sus unidades son A/W :

$$\mathfrak{R} = \frac{I}{P},$$

(ecuación 3.14)

La respuesta se relaciona con la eficiencia cuántica η , como sigue:

$$\mathfrak{R} = \frac{I}{P} = \frac{\text{electrones} / s \times e}{\text{fotones} / s \times h\nu} = \eta \frac{e\lambda}{hc},$$

(ecuación 3.15)

siendo e la carga del electrón, λ la longitud de onda de la radiación, h la constante de Planck (6.6225×10^{-34} J·s) y c la velocidad de la luz en el vacío.

En la ecuación 3.15, puede observarse la doble dependencia que presenta la respuesta con respecto a la longitud de onda: directamente a través del término λ , e indirectamente, por medio de la eficiencia cuántica, que es función de λ . Como esta última, la respuesta se ve enormemente influenciada por el tipo de material. [42]

Existen dos clases de fotodiodo:

- Fotodiodo PIN.
- Fotodiodo AVD o avalancha.

Para nuestro estudio de investigación solo se mencionará el fotodiodo PIN.

3.6.3 Fotodiodo *PIN*

Está constituido por una capa de semiconductor intrínseco (o ligeramente dopado) insertada entre dos capas de materiales dopados: una capa de tipo p y otra de tipo n . Como resultado de esta configuración, la región de desdoblamiento abarca completamente la zona intrínseca. Eligiendo convenientemente el espesor del material intrínseco, se logra disponer de una región de desdoblamiento más amplia y, con ello, de un fotodiodo con menor capacidad y superior eficiencia. La Figura 3.39 muestra el esquema básico de un diodo PIN. [42]

La luz entra al dispositivo a través de una ventana muy pequeña y cae sobre el material intrínseco carente de portadores. El material intrínseco se hace lo suficientemente grueso como para que la mayoría de los fotones que entren al dispositivo queden absorbidos por esta capa. En esencia, el fotodiodo *PIN* funciona exactamente al contrario que un *LED*. La mayoría de los fotones quedan absorbidos por electrones de la banda de valencia del material intrínseco. Cuando se absorben los fotones agregan la energía suficiente

para generar portadores en la región de agotamiento, y permiten el paso de la corriente por dispositivo.



Figura 3.38 Construcción de un fotodiodo *PIN*. [43]

El principio de funcionamiento es por medio del *efecto fotoeléctrico*, ya que la luz que entra por la ventana del fotodiodo *PIN* se absorbe en el material intrínseco y agrega la energía suficiente para hacer que los electrones pasen de la banda de valencia a la banda de conducción. El aumento en la cantidad de electrones que pasan a la banda de conducción produce un aumento en la cantidad de huecos en la banda de valencia. Para hacer que la corriente pase por un fotodiodo, se debe absorber luz de la energía suficiente para comunicar a los electrones de valencia la energía suficiente para que salten la banda prohibida. La banda prohibida, para el silicio es 1.12 eV (electrón volts). [43]

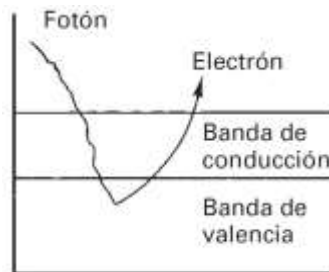


Figura 3.39 El fotón agrega la energía suficiente para que el electrón pueda pasar de la banda de valencia a la banda de conducción. [43]

CAPÍTULO 4 Desarrollo experimental

Para este capítulo se describe el desarrollo del sensor de nivel óptico tipo flotador, por lo que se presentará mediante un diagrama los elementos que constituyen el sistema del sensor. También se considera el trazado de rayos en una superficie plana y cóncava. Además de realizar la elección y pruebas pertinentes de los elementos a utilizar en el sensor, las cuales son las fibras ópticas, el diodo láser y el fotodetector.

4.1 Esquema del sistema de transmisión y recepción del sensor

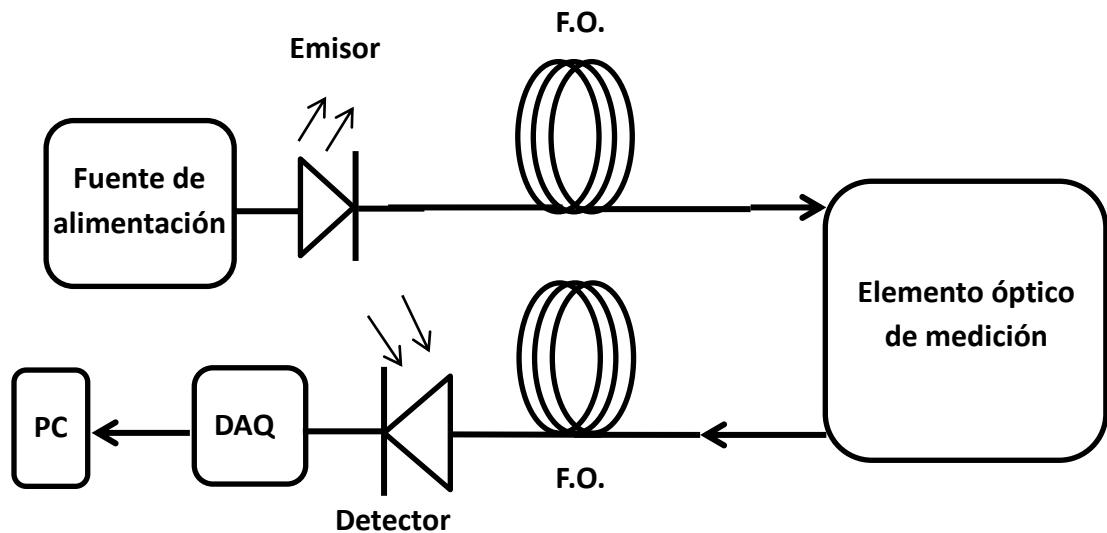


Figura 4.1 Diagrama de los elementos del sensor de nivel óptico.

En la Figura 4.1, es presentado un esquema general del sistema del sensor que corresponde de los elementos a implementar como es el caso de una fuente de alimentación, diodo láser, fibras ópticas (emisión y recepción), dispositivo detecto y una tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

4.2 Geometría del trazado de rayos

Para considerar la manera en cómo se llevará el análisis de los rayos, es necesario proponer un esquema del comportamiento de cada rayo de luz, se toma un diodo laser donde los rayos se dirigen a una superficie reflejante, el cual cada haz de rayo será reflejado y tendrá diferente su trayectoria de acuerdo a la inclinación que la superficie reflejante tenga respecto al nivel de líquido en la que se encuentra el flotador. Por lo que, el elemento detector dependerá de la posición de los rayos reflejados, así que se debe colocar las fibras ópticas en la mejor posición para captar la mayor cantidad de luz.

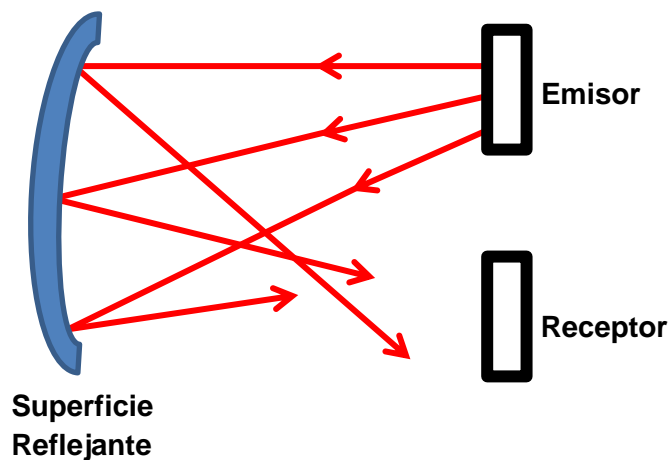


Figura 4.2 Proyección de rayos de luz en un medio cóncavo.

A continuación se proponen algunos diagramas del comportamiento de un rayo de luz al ser reflejado en una superficie plana y cóncava, los valores propuestos corresponden en las distancias de cada fibra óptica (emisora y receptora), fibras ópticas - zona reflejante, ángulo de inclinación de la zona reflejante y radios de curvatura de las superficies esféricas. Esto con el fin de obtener un rayo de luz reflejado hacia una segunda fibra óptica (fibra receptora) que proporcione una distancia corta entre las dos fibras ópticas (emisora y receptora).

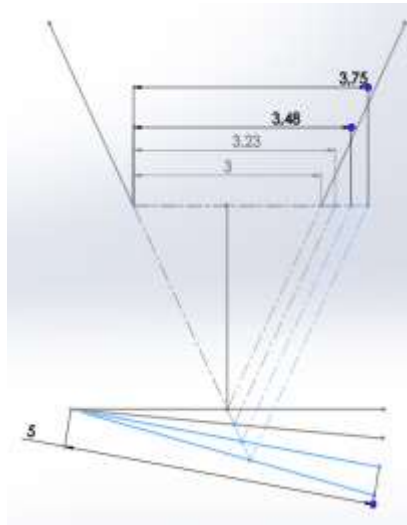


Figura 4.3 Espejo plano con emisor y receptor inclinados a 26.56° .

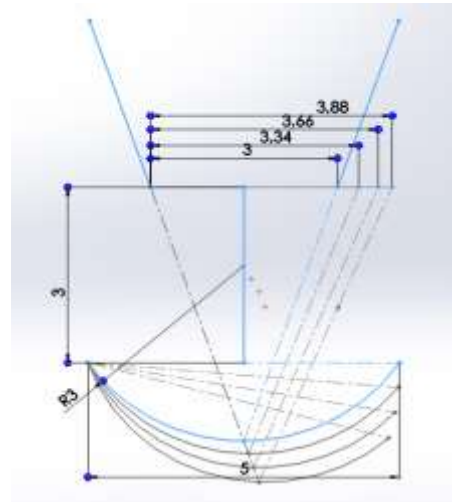


Figura 4.4 Espejo cóncavo con emisor y receptor inclinados a 26.56° .

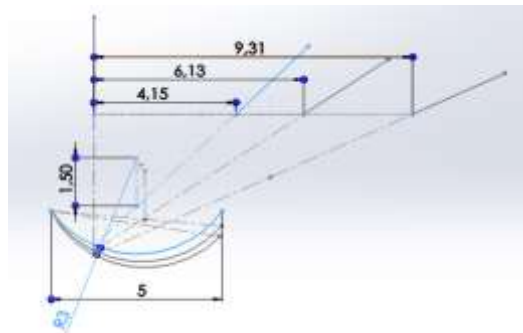


Figura 4.5 a) Espejo cóncavo con emisor perpendicular a la zona reflectora y receptor inclinado a 26.56° .

- Los ángulos que tienen las superficies reflectoras corresponden de 5° , 10° y 15° .

Así que el diagrama con el que se trabajará será el de la Figura 4.3 (espejo plano con inclinación en el emisor y receptor). A lo cual, en el siguiente diagrama de proyección de rayos (Figura 4.6) se detalla las medidas donde se ubicarán las fibras ópticas y la zona reflejante.

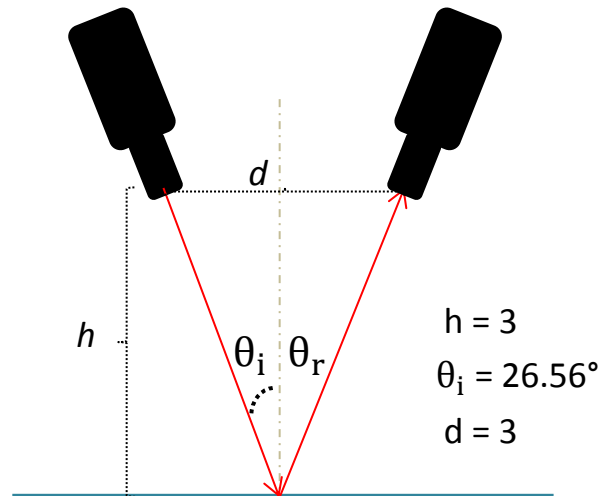


Figura 4.6 Propagación en la emisión y reflexión del haz de luz en una superficie plana ($\theta_i = \theta_r$). [44]

θ_i = Ángulo de incidencia.

θ_r = Ángulo de reflexión.

4.3 Selección de fibras ópticas

Para elegir el medio donde la luz viajara, son utilizadas las fibras ópticas, las cuales existen diversos tipos de ellas y éstas son clasificadas en diferentes maneras, tales como la propagación de la luz, índice de refracción y del material de las que son hechas. Para nuestro caso es importante considerar que se necesita que la fibra óptica pueda captar una gran cantidad de intensidad de luz, por lo que son utilizadas las fibras ópticas de plástico (POF), ya que tienen un diámetro mayor (núcleo y revestimiento) en comparación de las fibras multimodo o monomodo, por lo cual capturan más la luz en una superficie iluminada.

	Plástico	Vidrio	
Costo de accesorios	Bajo	Caro	
Flexibilidad	Flexible	Frágil	
Ø núcleo	980-880 μm	Monomodo 9 μm	Multimodo 50-65 μm
Conexiones	Fácil	Requiere herramientas especiales	

Tabla 4.1. Comparación de algunas características de las fibras de plástico y fibras de vidrio. [45]



Figura 4.7 Fibra óptica de plástico (TOSLINK audio). [46]

Características de las fibras ópticas de plástico (POF)

- Núcleo de PMMA (Polimetilmetacrilato) y $\text{Ø} = 880\mu\text{m}$.
- Revestimiento de Fluoropolímero y $\text{Ø} = 1 \text{ mm}$.
- Largo = 1.8 m. [46]

4.4 Elección del componente emisor

En el caso de la elección del emisor se consideraron dos elementos a utilizar, el led y el diodo láser. Para elegir el dispositivo emisor es importante considerar la potencia que pueda ofrecer cada elemento ya que con tal parámetro los rayos de luz tendrán mayor intensidad en su propagación por

el medio (fibras ópticas), por lo que una manera de conocer el comportamiento de la potencia es conociendo el espectro de cada dispositivo. En la Figura 4.8, se observa la distribución de energía de cada elemento propuesto, por lo que en un diodo láser es más concentrada y no se dispersa la potencia, en cambio en un led se dispersa más la potencia.

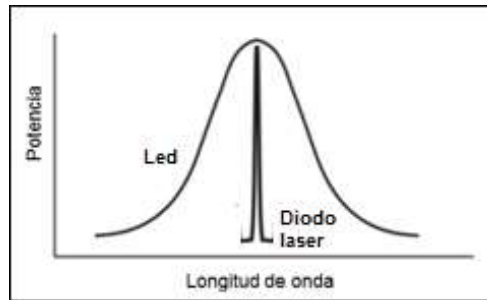


Figura 4.8 Espectro de Led y láser. [47]

Además otras características que favorecen el uso del diodo láser en comparación del led son:

- Coherencia
- Unidireccional
- Monocromática



Figura 4.9 Modulo diodo láser. [48]

Características del módulo diodo láser

- Longitud de onda = 650nm.
- Alimentación = 5V.
- Potencia de salida \approx 5 mW. [48]

4.5 Pruebas y mediciones de emisión

Para la alimentación del diodo láser, es conectado hacia el Arduino UNO y además es colocado un elemento mecánico que permite el desplazamiento del diodo láser para ubicarlo en la mejor posición hacia un objetivo microscópico de la marca Olympus, de magnificación 20X, apertura numérica 0.4 y distancia de trabajo de 1.2 mm. Así que, con este elemento óptico, brindará el enfoque y confinamiento de la luz del diodo láser hacia la fibra óptica, como es visto en la Figura 4.10, donde es colocado el diodo laser en la entrada del objetivo microscópico, y en la Figura 4.11, donde se ajusta la distancia focal de la luz del diodo laser y que será enviado hacia la entrada de la fibra óptica de plástico.

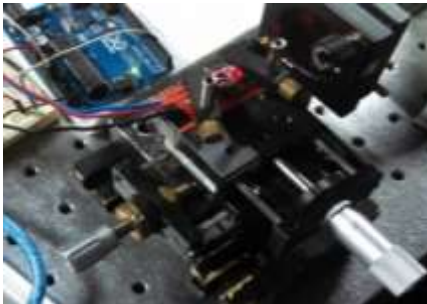


Figura 4.10 Colocación del diodo laser en una estructura mecánica de desplazamiento de 2 ejes.



Figura 4.11 Ajuste de la distancia focal en la lente microscópica.

Al ajustar el haz del diodo láser, se utiliza un medidor de potencia para el espectro visible, en este caso se configura para que esté operando en la longitud de onda de 650 nm y también ajustando la potencia, ya que la mayoría de los dispositivos optoelectrónicos utilizan tal unidad, todo estos ajustes para conocer la potencia de trabajo del diodo láser



Figura 4.12 Medición de la potencia del diodo láser después de haber confinado la luz con el objetivo microscópico (**3mW**).

4.6 Pruebas y mediciones con la fibra óptica

Las pruebas de la fibra óptica de plástico fueron realizadas con el diodo láser, para conocer la potencia de salida de dicha fibra, por lo que se utiliza un elemento mecánico para desplazar la fibra óptica a la posición de la distancia focal de la lente microscópica, vista en la Figura 4.13.



Figura 4.13 Colocación de la fibra óptica de plástico en una estructura mecánica de desplazamiento de 3 ejes.



Figura 4.14 Alineación de la entrada de la POF con el objetivo microscópico.



Figura 4.15 Medición en la salida de la primera POF (fibra emisora).

La fibra emisora con el objetivo microscópico proporciona un valor de potencia de **2.59 mW**.

Un aspecto que se observó fue que el haz de luz en la salida de la fibra emisora, se dispersa como es visto en la Figura 4.16, y sí es utilizado tal comportamiento tendríamos pérdidas en la emisión de luz al llegar en la zona reflejante. Así que fue utilizada una lente óptica para led de potencia con ángulo de apertura de 30° de la marca SiLED BK-LED-2015 de AG Electrónica [50]. Al ser una lente esférica cóncava, presenta la característica de confinar la luz en una región (foco) obteniendo mayor intensidad de luz, lo que origina un haz de forma spot, como se puede ver en la Figura 4.17.



Figura 4.16 Emisión del haz de luz en la fibra óptica (luz dispersada).



Figura 4.17 Emisión del haz de luz confinado con una lente óptica de led (Distancia focal de 0.6 cm).

4.7 Pruebas y mediciones de recepción

Conociendo la potencia en la que la fibra emisora trabaja, se coloca la segunda fibra óptica (fibra receptora) para conocer la potencia de salida en dicha fibra (recepción), por lo que obtenemos:



Figura 4.18 Medición en la salida de la segunda POF (fibra receptora).

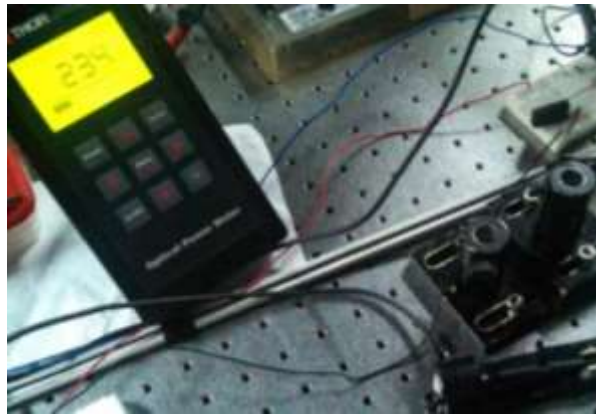


Figura 4.19 Medición en la salida de la segunda POF (fibra receptora) con una potencia de **2.34 μW** .

4.8 Elección del componente detector

Para elegir el dispositivo detector, es necesario considerar que la longitud de onda que está trabajando el diodo láser corresponde a 650 nm (rojo), así que el dispositivo detector tendría que operar en el espectro visible (400 nm - 700 nm), por lo que en la búsqueda de información en la red y en catálogos, se halló un fotodiodo que opera en la región espectral requerida, vista en la Figura 4.20, por lo que se trata de un fotodiodo PIN.

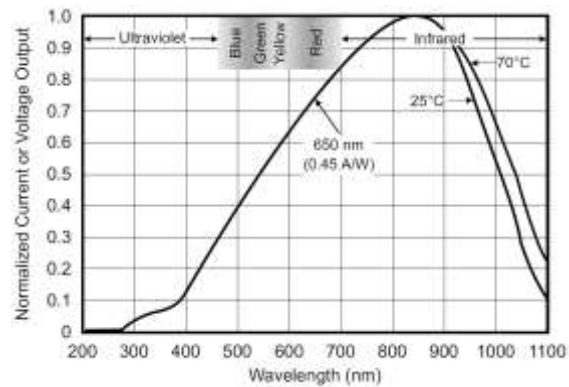


Figura 4.20 Respuesta Espectral del fotodiodo. [49]

Características del Fotodiodo PIN

- Alimentación: 2.7 to 36 V.
- Tamaño del fotodiodo: 2.29 mm × 2.29 mm.
- Responsividad: 0.45 A/W (650 nm).
- Temperatura: 0°C to 70°C. [49]



Figura 4.21 Fotodiodo OPT101. [49]

4.9 Pruebas y mediciones en la salida del fotodetector

Es realizado la conexión del fotodiodo de acuerdo a la hoja de datos del OPT101, el cual es mostrado en la Figura 4.22 con el fin de conocer el nivel de voltaje al trabajar en su máxima recepción de luz.

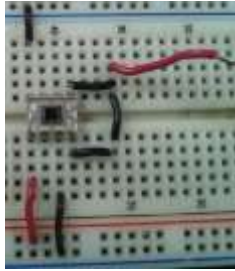


Figura 4.22 Conexión del fotodiodo OPT101 en una protoboard.



Figura 4.23 Ajuste y colocación perpendicular de la fibra receptora hacia la zona de recepción del fotodiodo.

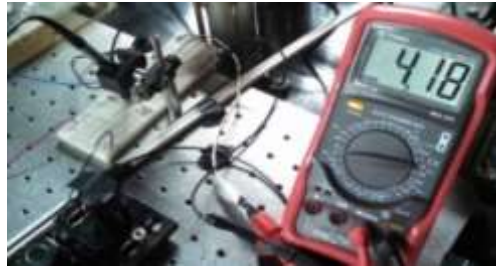


Figura 4.24 Voltaje en la salida del fotodiodo en la máxima recepción de la señal óptica (4.18 V).

Las mediciones preliminares se visualiza que el nivel de voltaje tenía un comportamiento inestable, así que se utilizó un osciloscopio digital Tektronix de modelo TDS220, para observar la salida de voltaje del fotodiodo.

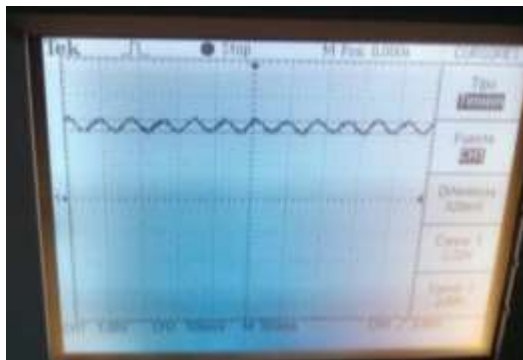


Figura 4.25 Señal en la salida del fotodiodo medido con el osciloscopio con variación de **320 mV**.

Ahora se conoce que la señal de salida del fotodiodo presenta ruido (Figura 4.25) y con esto se presentan variaciones de voltaje de 0.3 a 0.4 V en la adquisición de datos y no permitiría conocer el nivel de voltaje en la que se encuentra el sensor, así que es necesario implementar un filtro para atenuar la mayor cantidad de ruido que presenta en la salida del fotodiodo para obtener un nivel de voltaje más estabilizado.

4.10 Diseño del filtro

Es utilizado como propuesta el filtro pasabajas RC, ya que es un filtro básico para su análisis e implementación.

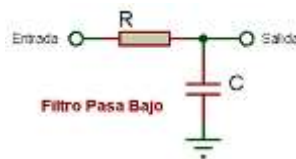


Figura 4.26 Esquema del filtro RC.

Para conocer el tiempo de respuesta que tendría el filtro respecto al voltaje de salida, se muestra con la siguiente expresión

$$Tiempo = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot C .$$

(ecuación 4.1)

Los valores elegidos para obtener un tiempo de respuesta del voltaje son:

- R = 56 Ω .
- C = 470 μf .

Así que el ***Tiempo*** = 0.1653 s

Cabe mencionar que se diseñó en ISIS Proteus el circuito del filtro RC con el fotodiodo, esto con el propósito de tener una placa fenólica destinada para la etapa de detección de luz del sensor de nivel.

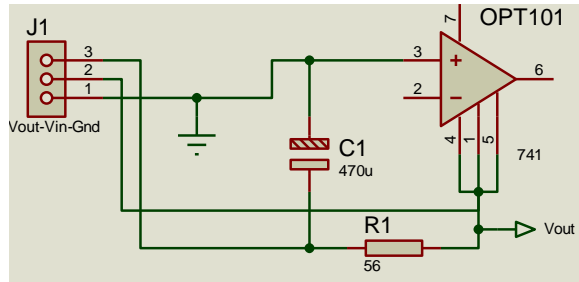


Figura 4.27 Circuito esquemático del filtro en ISIS PROTEUS.



Figura 4.28 Filtro RC y fotodiodo PIN en placa fenólica.

4.11 Pruebas y mediciones del detector con el filtro

Antes de realizar las pruebas de medición de voltaje, es diseñado un soporte que permita fijar la fibra óptica, con el fin que el haz de luz llegue en la zona de detección del fotodiodo, por lo que es utilizado el software de Solidworks para obtener la pieza requerida.

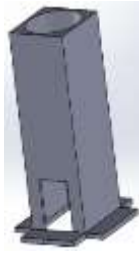


Figura 4.29 Diseño del soporte de la fibra óptica receptora en Solidworks.



Figura 4.30 Implementación del soporte de la fibra receptora con el fotodiodo.

Nuevamente es llevado a cabo las mediciones para conocer el comportamiento de la señal de salida del fotodiodo (voltaje).



Figura 4.31 Salida de la luz hacia el fotodiodo.



Figura 4.32 Medición del voltaje en el fotodiodo con el filtro RC.

Ahora el nivel de voltaje es estable al medir con el multímetro, así que el filtro RC que se utilizó ha funcionado, y para observar con más detalle la señal, es utilizado el osciloscopio para visualizar la variación de la señal de salida.

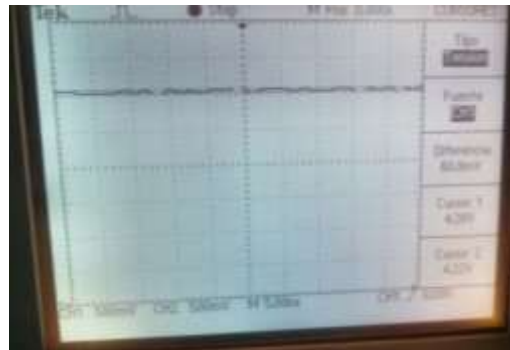


Figura 4.33 Medición en la salida del fotodiodo (con el filtro RC) utilizando el osciloscopio con variación de **60 mV**.

4.12 Resultados preliminares de las mediciones

Se muestran a continuación valores obtenidos de acuerdo a valores máximo y mínimo de voltaje y potencia que permite detectar el fotodiodo.

	Mínimo	Máximo
Voltaje [V]	0.15	4.17
Potencia [μ W]	0.05	2.34

Tabla 4.2 Resultados de voltajes y potencia en la salida del fotodiodo.

En la Figura 4.34, obtenida en la hoja de datos del fotodiodo OPT101, se puede visualizar la zona en la que operaría el fotodiodo de una forma ideal, y de acuerdo a los valores obtenidos y mostrados en la Tabla 4.2 se puede corroborar que el fotodiodo está operando bien, en la cuestión de voltaje de salida respecto a la potencia de radiación.

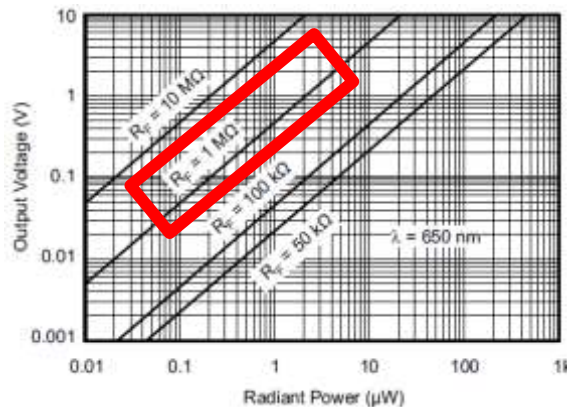


Figura 4.34 Región donde estará trabajando el sensor. [49]

4.13 Diseño del prototipo del sensor de nivel

Se presenta a continuación un bosquejo del diseño general de la propuesta del sensor de nivel óptico que se pretende diseñar en Solidworks.

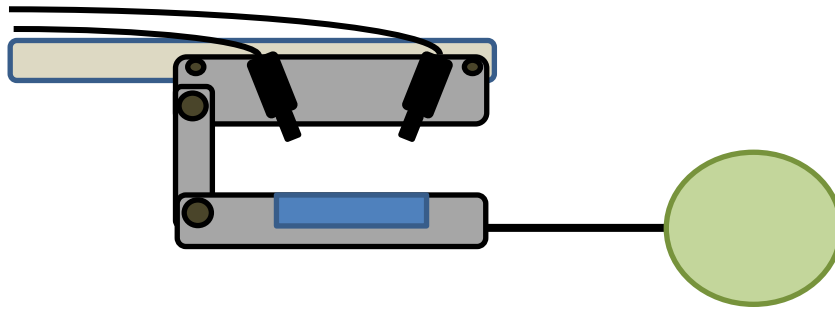


Figura 4.35 Bosquejo del sensor de nivel óptico tipo flotador propuesto.

4.13.1 Prototipo 1

Para realizar las piezas del sensor de nivel, son diseñadas con el software de Solidworks cada elemento requerido (considerando lo expuesto en la Figura 4.6). Para llevar a cabo la impresión de las piezas, primero es generado un archivo llamado .gcode, el cual es obtenido por otro software (Simplify 3D), por lo que al obtener el archivo requerido es enviado a la impresora 3D para tener impresas las piezas del sensor.

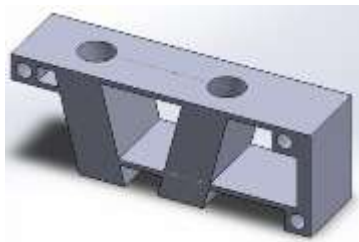


Figura 4.36 Diseño en Solidworks de la pieza superior (cuerpo) del prototipo 1.

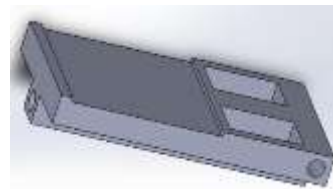


Figura 4.37 Diseño en Solidworks de la pieza inferior (superficie reflectora) del prototipo 1.



Figura 4.38 Partes laterales del prototipo 1.

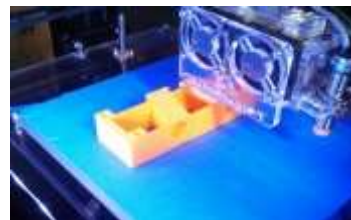


Figura 4.39 Impresión del cuerpo del sensor en la impresora 3D.

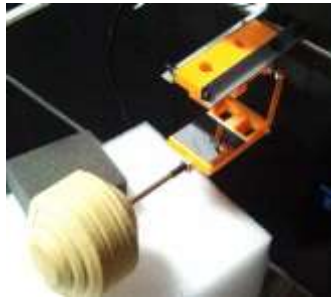


Figura 4.40 Piezas ensambladas del prototipo 1 sensor de nivel óptico tipo flotador.



Figura 4.41 Colocación de las fibras ópticas (emisora y receptora) y de la lente esférica en la primera fibra.

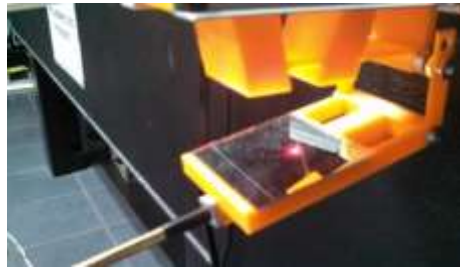


Figura 4.42 Funcionamiento del prototipo 1 sensor de nivel.

Observaciones: En el prototipo 1 se realizaron pruebas preliminares del comportamiento del flotador al permanecer en sin y con inclinación de forma manual (subir y bajar el flotador). El sensor funciona, pero presenta inestabilidad en la zona reflejante debido a que en las piezas denominadas laterales no están fijas, a pesar de que se utilizan tuercas que fijan la parte superior e inferior del sensor. Por lo tanto se sugiere diseñar otro prototipo donde se fije aquella zona detectada.

4.13.2 Prototipo 2

En este prototipo fue considerado las observaciones del prototipo 1, así que se fijó la zona donde se conectan la pieza superior e inferior, además de

hacer más pequeño cada pieza, tomando en cuenta las dimensiones de las fibras ópticas, lente esférica y espejo plano.

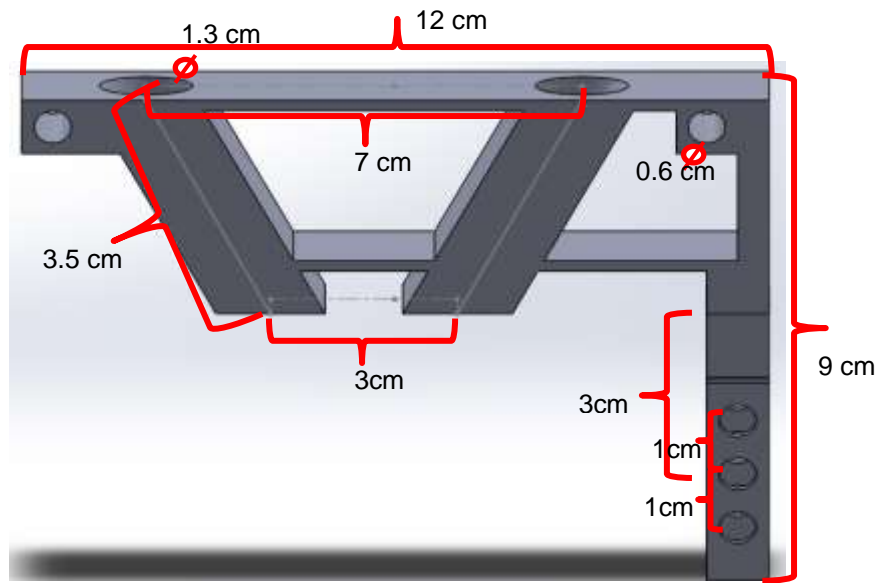


Figura 4.43 Diseño en Solidworks de la parte superior del prototipo.

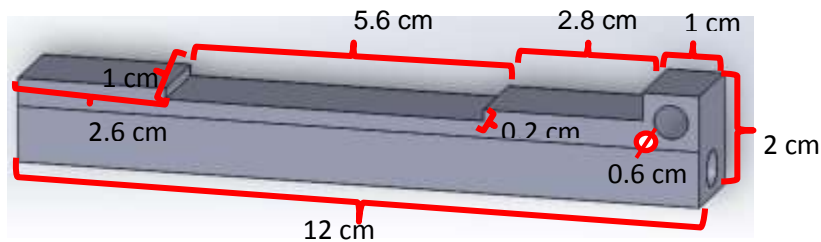


Figura 4.44 Diseño en Solidworks de la parte inferior del prototipo.

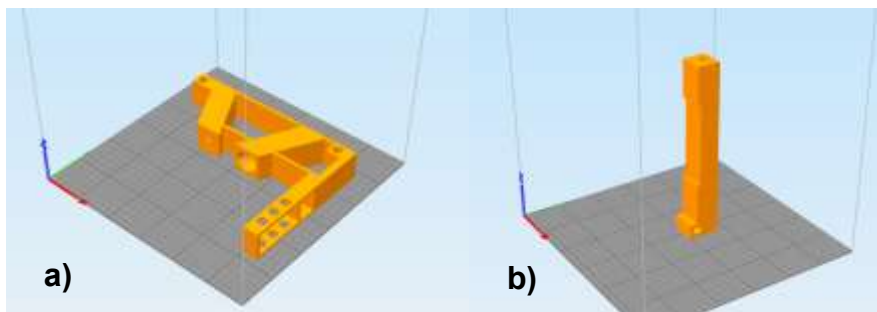


Figura 4.45 Uso del software Simplify 3D para crear el archivo gcode para que pueda operar la impresora 3D. a) Visualización de parte superior del sensor. b) Visualización de parte inferior del sensor.



Figura 4.46 Piezas impresas y fibras ópticas ensambladas en el prototipo 2. Sensor de nivel óptico tipo flotador.



Figura 4.47 Vista de la emisión (uso de la lente esférica) y recepción del haz de luz en el prototipo 2.

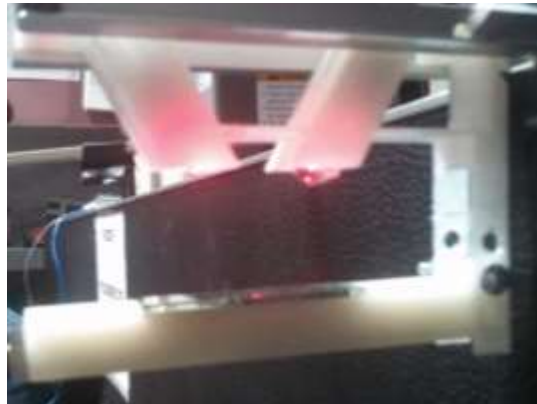


Figura 4.48 Funcionamiento del prototipo 2 sensor de nivel.

Observaciones: En el prototipo 2 se corrigió el problema presentado en el anterior prototipo y las dimensiones se acotaron de acuerdo a los elementos utilizados del sensor (fibras ópticas, lente esférica y espejo). Por lo que se realizarán las mediciones correspondientes para conocer el rango de operación (ángulo) que tendrá este sensor.

4.14 Medición del ángulo de inclinación del flotador

Para hallar el valor del ángulo de inclinación, es considerado el desplazamiento de la superficie reflectora, tomando en cuenta el valor del voltaje mínimo y máximo detectado por el fotodiodo. Lo cual es necesario utilizar un elemento mecánico que permita el desplazamiento que va teniendo la superficie reflectora (un valor llamado altura, comportamiento dado por la Figura 4.50), por lo cual es utilizado un micrómetro que permite que la base de la zona reflejante sea desplazado a una altura establecida y así obtener cierta cantidad de luz que en la fibra receptora es capaz de captar y ser enviada hacia el fotodiodo, el cual convertirá la luz recibida en un voltaje.



Figura 4.49 Uso de un elemento mecánico para el desplazamiento del sensor (superficie reflectora) para obtener la inclinación (ángulo de operación).

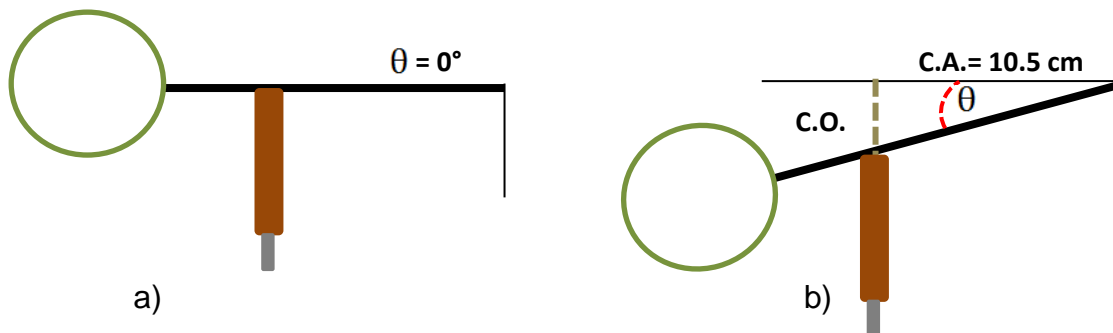


Figura 4.50 a) Flotador a 0° con elemento mecánico y b) Flotador a θ° con elemento mecánico.

Tomando en cuenta que el punto de referencia, base de la zona reflejante, (corresponde a 10.5 cm) se empezará el desplazamiento del flotador. Se aplica lo que se conoce como razones trigonométricas, para este caso se toma la función de tangente, así que es necesario conocer dos parámetros un Cateto Adyacente, dado por la base de la superficie reflectora y un Cateto Opuesto, que sería el valor del desplazamiento que tendrá el micrómetro. De tal manera despejando θ de tangente, se realizarían las operaciones requeridas para hallar el ángulo en la que se encuentra el flotador.



Figura 4.51 Inclínación 0° del flotador (voltaje máximo).



Figura 4.52 Inclínación θ del flotador (voltaje mínimo).

Los valores conocidos son:

- **C.O. = 1.22 cm** (distancia máxima donde el fotodiodo logra percibir el luz de la fibra receptora).
- **C.A. = 10.5 cm** (tamaño de la superficie reflectora).

Es utilizada la expresión trigonométrica de tangente:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{C.O.}}{\text{C.A.}} \right). \quad (\text{ecuación 4.2})$$

Así que el ángulo de operación para el prototipo corresponde a obtenido es:

$$\theta \approx 6.75^\circ.$$

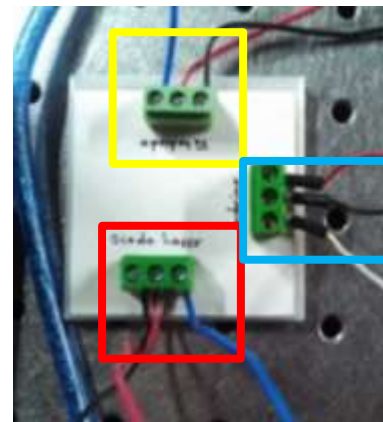
4.15 Implementación de la DAQ (Adquisición de datos)

Para recolectar la información (niveles de voltaje) es necesario utilizar un dispositivo que permita adquirir esos datos y mostrarlos en una pantalla, para que el usuario pueda conocer y manipular dichos valores.

Es usado la tarjeta Arduino UNO como dispositivo de adquisición de datos, además permite la alimentación del diodo laser y del fotodiodo, por lo que fue construido un circuito de conexiones de alimentación para los dispositivos usados en el sensor (diodo laser y fotodiodo) así como la señal de salida (voltaje) del fotodiodo hacia el puerto ADC (convertidor analógico-digital) del Arduino (Figura 4.54).



Figura 4.53 Arduino UNO como tarjeta de adquisición de datos.



- Conexión del Arduino.
- Alimentación del Diodo laser.
- Alimentación del fotodiodo / salida del Fotodiodo a señal analógica del Arduino.

Figura 4.54 Configuración y conexiones (Arduino, diodo laser y fotodiodo).

4.15.1 Uso del software de adquisición de datos

Para visualizar la información de tal forma que el usuario pueda conocer el nivel de voltaje y el rango de operación (ángulo de inclinación) del sensor, es propuesto el uso de LabVIEW. Mediante la programación en LabVIEW, se considera el uso de funciones que permitan conocer los valores requeridos para el correcto funcionamiento del sensor. Además se pueden añadir algunos elementos gráficos en una pantalla para visualizar mejor el comportamiento del nivel de líquido.

Una manera de encontrar una relación de voltaje y grados, puede ser dada mediante la ecuación de la recta dado 2 puntos, expresada en la ecuación 4.3, el cual es necesario tener establecidos los valores máximos y mínimos de voltaje y grados del sensor de nivel para ser utilizada tal expresión y obtener un valor en grados respecto al nivel de voltaje proporcionado por la salida del fotodiodo.

$$\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1}.$$

(ecuación 4.3)

donde:

X = Voltaje medido (salida del fotodiodo).

X_1 = Voltaje mínimo (0.15 V).

X_2 = Voltaje máximo (4.17 V).

Y = Grados en relación al voltaje medido.

Y_1 = Grados máximo (0°).

Y_2 = Grados mínimo (7°).

Despejando Y (grados en relación al voltaje medido) de la expresión 4.3, obtenemos:

$$Y = \left[\left(\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} \right) \cdot (Y_2 - Y_1) \right] + Y_1 .$$

(ecuación 4.4)

Ahora, se prosigue con la programación en LabVIEW, creando un VI (programa en LabVIEW) que se encargue de representar la expresión obtenida anteriormente (ecuación 4.4). Al obtener dicho VI, se modifica la apariencia del VI y se crea un subVI (Vi dentro de un VI), el cual cumplirá la función solamente de relación la expresión 4.4 en un programa general que se desee realizar más adelante.

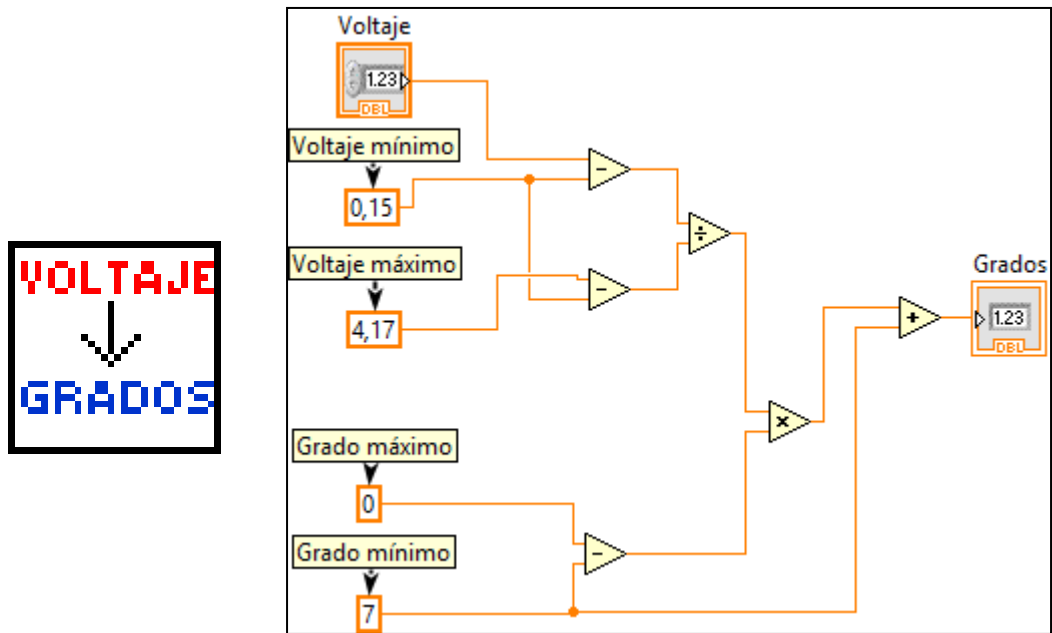


Figura 4.55 SubVI y diagrama de bloques de Voltaje/Grados.

Al tener la función (subVI) de relación Voltaje/Grados, se realizará un programa que involucre las dimensiones del flotador y del brazo.

4.15.2 Ecuaciones del mecanismo de medición del nivel de líquido y programación

El siguiente diagrama (Figura 4.56), se visualizan los parámetros requeridos para obtener expresiones que permitan conocer el nivel de líquido.

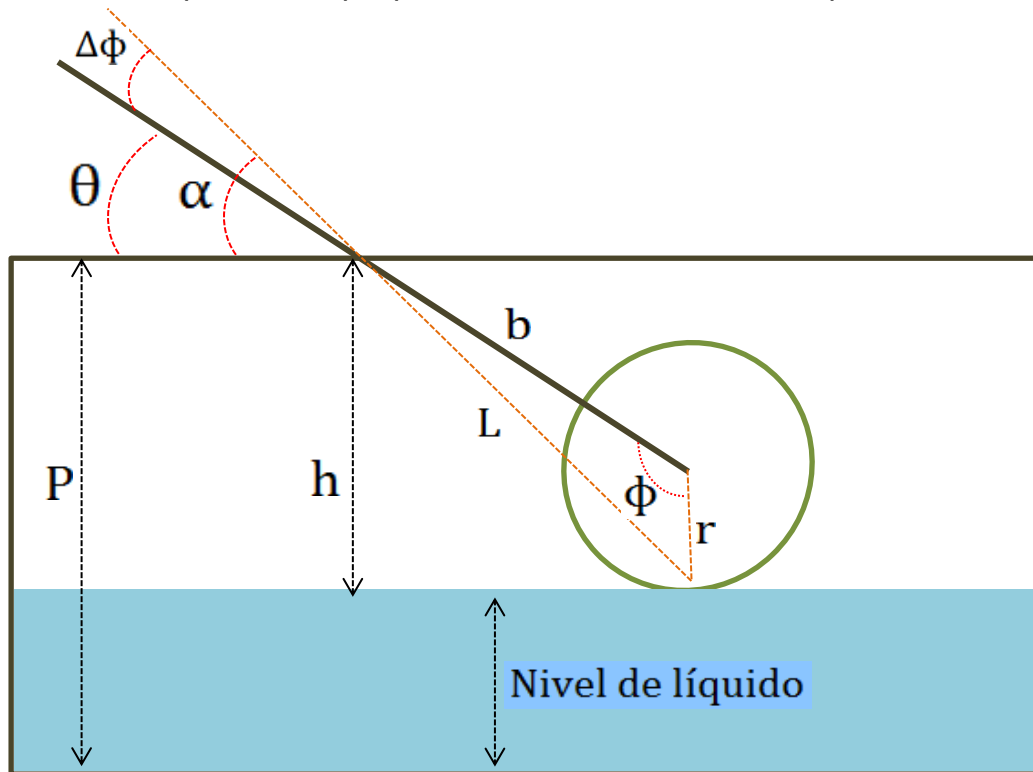


Figura 4.56 Representación del mecanismo del flotador.

Si el globo del flotador es significativamente grande con respecto a su brazo de palanca con en este caso, debe considerarse su radio en el desarrollo de las ecuaciones.

El vector L que parte del origen al punto donde el agua hace contacto con el flotador forma un triángulo con su radio r y brazo de palanca b . Sabiendo que el ángulo ϕ entre b y r depende de la inclinación θ del brazo del flotador, puede obtenerse de la siguiente manera:

$$\phi = \theta + 90^\circ .$$

(ecuación 4.5)

Con el que puede obtenerse la magnitud del vector **L**, aplicando la ley de cosenos:

$$L = \sqrt{b^2 + r^2 - 2 \cdot b \cdot r \cdot \cos \phi}.$$

(ecuación 4.6)

Para proyectar el vector **L** sobre el eje Y debe conocerse el ángulo opuesto al lado **r**, llamado **$\Delta\phi$** , que se obtiene a partir de la ley de senos:

$$\Delta\phi = \sin^{-1}\left(\frac{r \cdot \sin \phi}{L}\right).$$

(ecuación 4.7)

La inclinación total de **α** del vector **L** está dada por:

$$\alpha = \Delta\phi + \theta.$$

(ecuación 4.8)

La altura **h** sobre el eje y del flotador es:

$$h = L \cdot \sin \alpha.$$

(ecuación 4.9)

Si la profundidad total del contenedor es **P**, el nivel del agua está dado por:

$$\text{Nivel del líquido} = P - h.$$

(ecuación 4.10)

Los datos conocidos del mecanismo del flotador corresponden a:

b = Largo del vástago (25 cm).

r = Radio del flotador (4.7 cm).

θ = Inclinación del vástago del flotador.

P = Profundidad del contenedor.

Por lo que con estos valores y las expresiones encontradas anteriormente (ecuaciones 4.5 - 4.10) es conveniente realizar otro programa en LabVIEW (subVI) para comprender el funcionamiento del sensor de nivel de acuerdo a los valores registrados (niveles de voltaje) en la medición.

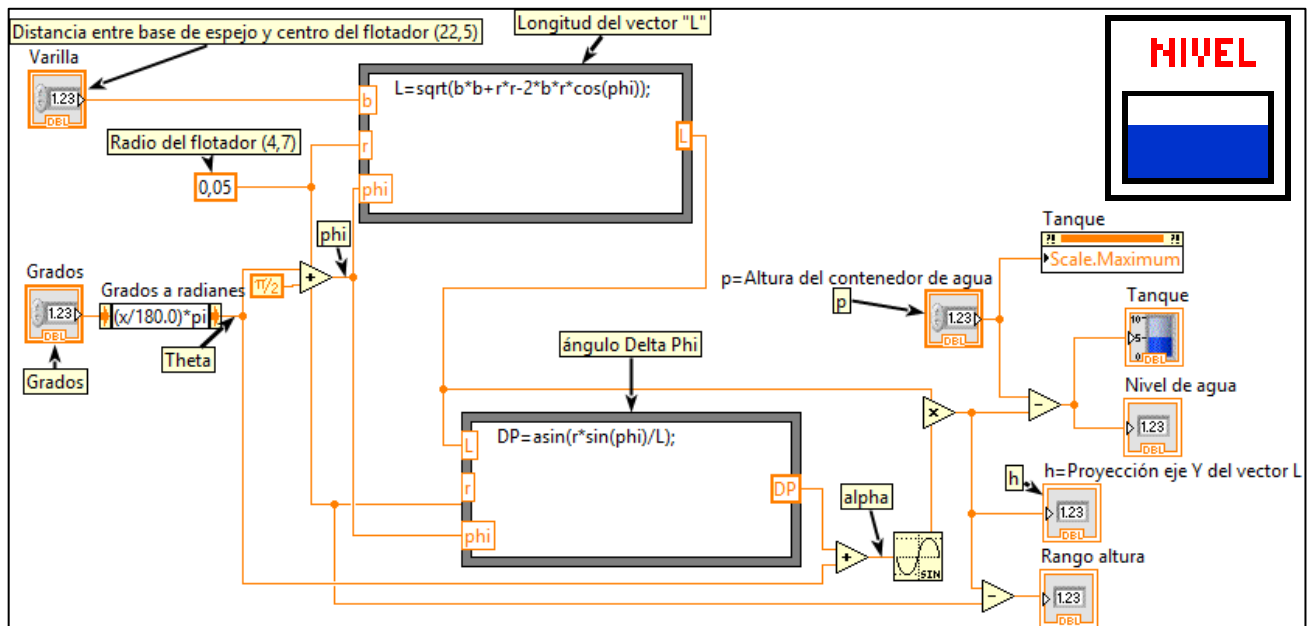


Figura 4.57 Diagrama de bloques y subVI del nivel de líquido.

4.15.3 Programación en diagrama de bloques y pantalla para el usuario

Para llegar a realizar una pantalla de usuario, es indispensable contar con los subVIs de “Voltaje/Grados” y “Nivel”, ya que ambos nos proporcionan datos que son importantes para el sensor y que se puedan manipular para que el usuario logre visualizar el comportamiento del sensor de nivel de una mejor manera.

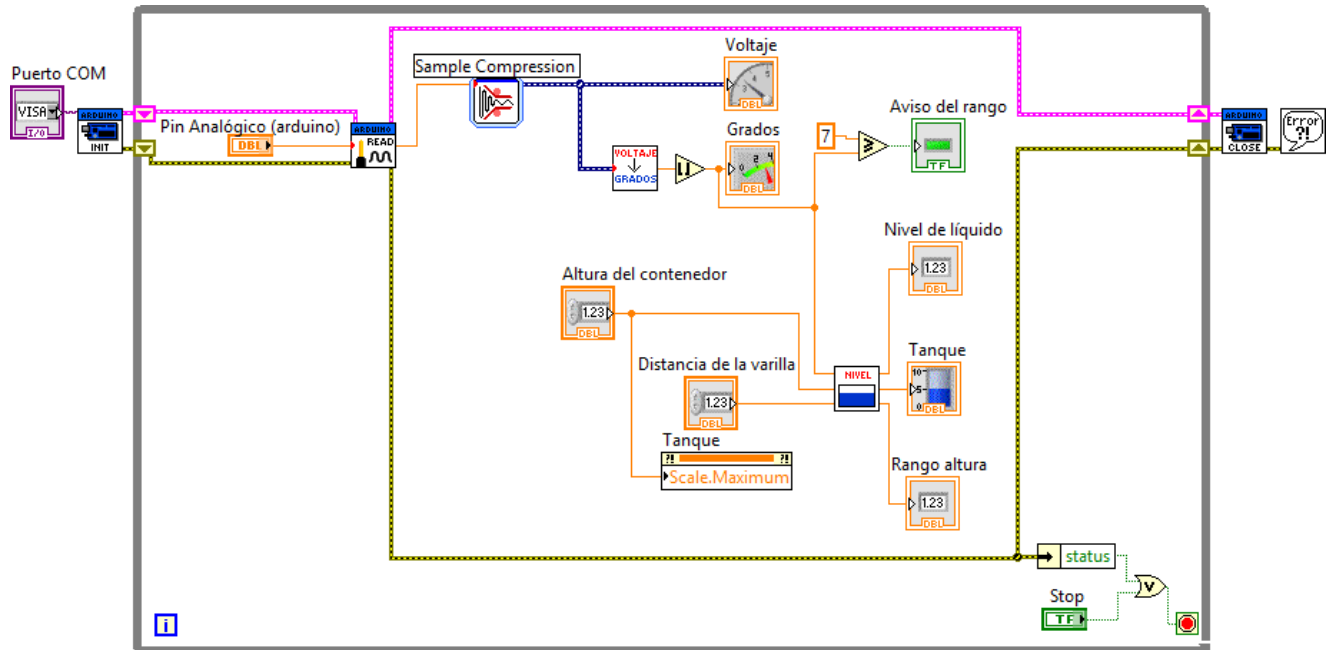


Figura 4.58 Diagrama de bloques general en LabVIEW.

En el diagrama de bloques de la Figura 4.58, están expuestos los elementos que constituyen el código de programación para el funcionamiento del sensor de nivel. El cual se puede ver que están los bloques de configuración del Arduino y del puerto analógico que se utilizará para la adquisición de datos. Además de un compresor de muestras (adquiere un número grande datos y comprime dicho datos a un número más pequeño), así como el indicador de voltaje y los subVIs diseñados (Voltaje/Grados y Nivel) para que cumplan con las funciones ya mencionadas en los apartados anteriores. Por último cuenta con un indicador que proporciona si se encuentra dentro o fuera del rango de

operación, tomando en cuenta el ángulo de inclinación de la superficie reflectora.

En la Figura 4.59, se presenta la pantalla de visualización por la que el usuario podrá manipular algunos parámetros y observar el comportamiento del nivel de voltaje (salida del fotodiodo), grados (inclinación de la superficies reflectora), nivel del líquido (altura del líquido) y rango de altura (altura de operación del sensor). También se incluye un indicador que señala si el sensor está operando dentro o fuera del rango de operación (establecido por el ángulo de operación).

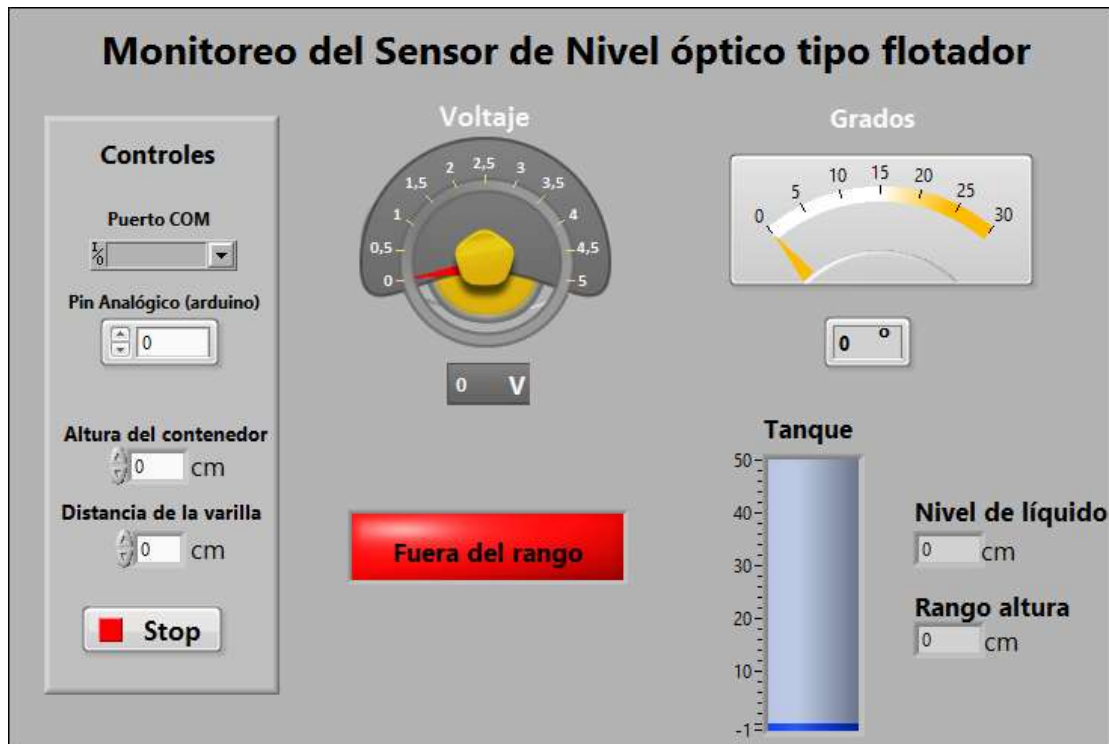


Figura 4.59 Pantalla de usuario en LabVIEW.

Con tal pantalla de monitoreo, se realizarán las pruebas del prototipo o prototipos ya diseñados e implementados que se deseen analizar para conocer la funcionalidad y gráficas de operación del sensor de nivel.

CAPÍTULO 5 Resultados y discusión

En este capítulo se reportan los diferentes prototipos realizados para el diseño del sensor de nivel, en la cual son mostradas las gráficas que representan el comportamiento del nivel de voltaje respecto a un ángulo, de tal forma que al final, se obtengan tablas comparativas de los prototipos y así determinar con cual diseño se implementará como el sensor de nivel, tomando como primordial parámetro el de mayor ángulo y altura. También es de considerar un tamaño más compacto del prototipo elegido.

5.1 Diseño de Prototipo 1

En el prototipo de la Figura 5.1, solo se pudo observar el comportamiento del haz de luz en una superficie plana. No fue realizada alguna gráfica sobre el comportamiento, debido a que presentaba problemas en los soportes laterales, ya que no se mantenía estable la zona reflejante.



Figura 5.1 Prototipo 1 del sensor de nivel.

De este prototipo presenta la limitante de ser inestable en la zona reflejante, así que se modificará los soportes laterales para ser secciones fijas entre el cuerpo del sensor y la zona reflejante. Además de hacer más compacto el diseño de acuerdo a las dimensiones de las fibras y la superficie reflectora.

5.2 Diseño de Prototipo 2

Se presenta en la Figura 5.2, la sección donde fue modificado el prototipo, se consideró un espesor y ancho mayor para evitar movimientos en la base reflectora. Por lo tanto, se permitió obtener las mediciones en superficies plana y cóncava.



Figura 5.2 Diseño del prototipo 2 en Solidworks.

Son utilizadas láminas de aluminio, Figura 5.3, para obtener las superficies cóncavas, de las cuales son lijadas hasta tener un acabado espejo, y así conseguir una mejor reflexión en la luz.



Figura 5.3 Láminas de aluminio.

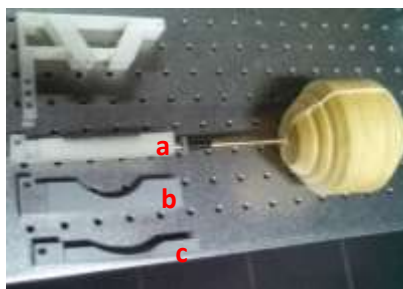


Figura 5.4 Cuerpo del sensor y superficies reflectoras del Prototipo 2. a) Plana b) Cóncava (radio 3 cm) c) Cóncava (radio 4.6 cm).



Figura 5.5 Prototipo 2 en funcionamiento en la superficie cóncava.

Se muestran a continuación las gráficas correspondientes en las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8 a las superficies reflectoras utilizadas para el prototipo 2 y sus ángulos de operación de cada una. El desplazamiento corresponde a 0.01 in (0.254 mm).

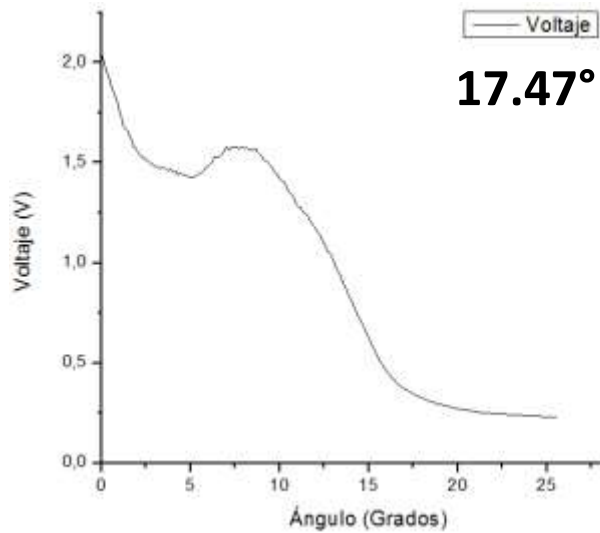


Figura 5.6 Superficie plana (espejo) prototipo 2

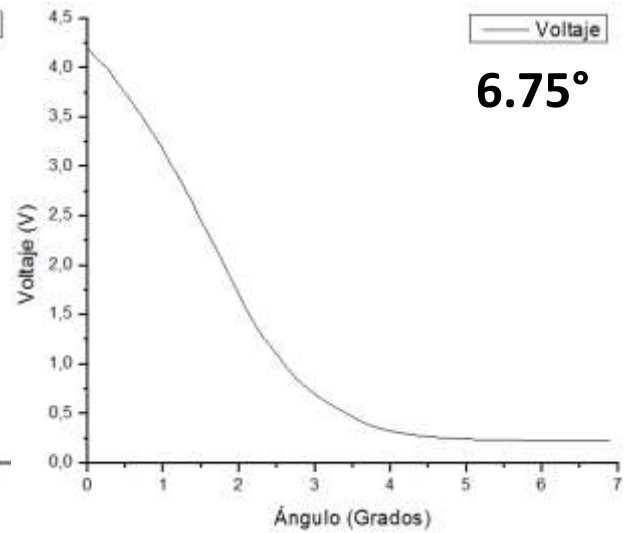


Figura 5.7 Superficie cóncava de radio 3 cm prototipo 2.

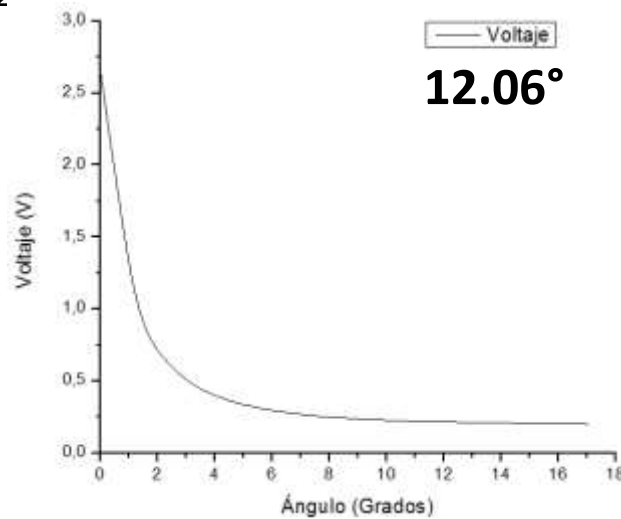


Figura 5.8 Superficie cóncava de radio 4.6 cm prototipo 2.

Para este prototipo la limitación que se presentó fue que solo se contaba con una fibra óptica receptora y se observó que se podría colocar otra fibra

receptora para incrementar el rango de operación, así que se añadirá otra fibra óptica para captar el haz de luz reflejado.

5.3 Diseño de Prototipo 3.1

En la Figura 5.9 se muestra el diseño modificado, donde se indica la segunda fibra receptora. Se realizaron las mismas mediciones respecto a las bases reflectoras anteriores, excepto la del radio de 3 cm, ya que el haz de luz se desplazaba hacia la segunda fibra, pero hasta determinado ángulo empezaba a desplazarse hacia la fibra de emisión, esto debido a las características de la zona reflejante y el ángulo del haz emisor. También se hizo un cambio respecto a la fuente de alimentación del fotodiodo, ya que dependía directamente del Arduino, y se colocó una fuente externa.

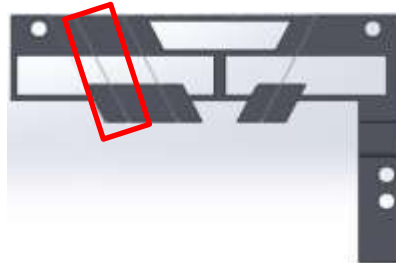


Figura 5.9 Diseño del prototipo 3 en Solidworks.



Figura 5.10 Superficies reflectoras del prototipo 3. a) Plana b) Cóncava (radio 4.6 cm).



Figura 5.11 Prototipo 3.1 en funcionamiento en la superficie cóncava.

Se muestra a continuación las gráficas del comportamiento de cada superficie reflectora (Figuras 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15).

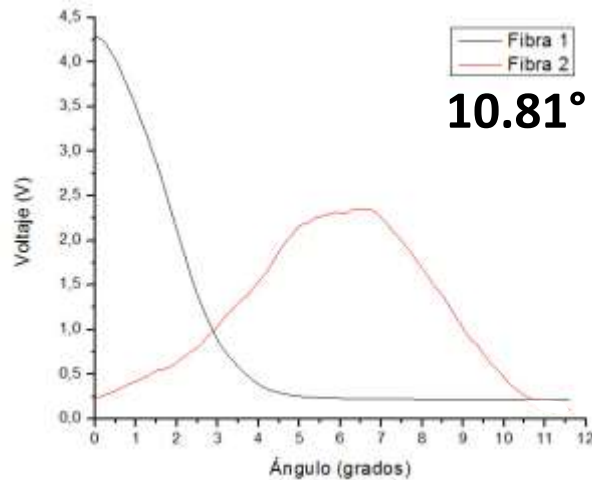


Figura 5.12 Superficie plana (voltaje del Arduino).

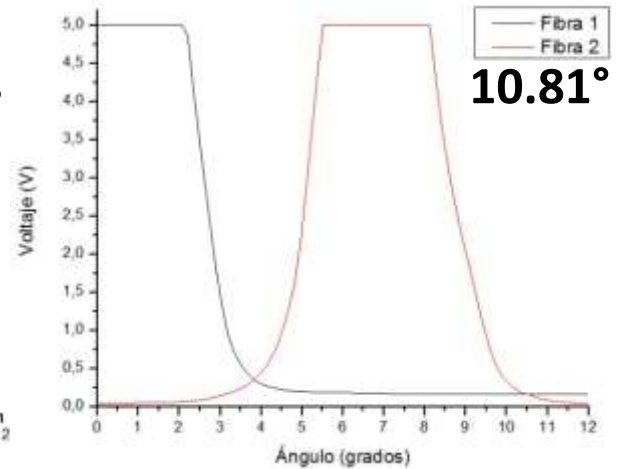


Figura 5.13 Superficie plana (voltaje externo).

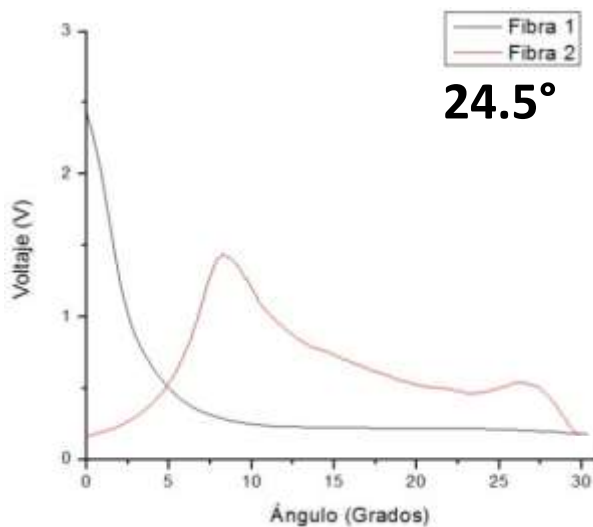


Figura 5.14 Superficie cóncava de radio 4.6 cm (voltaje del Arduino).

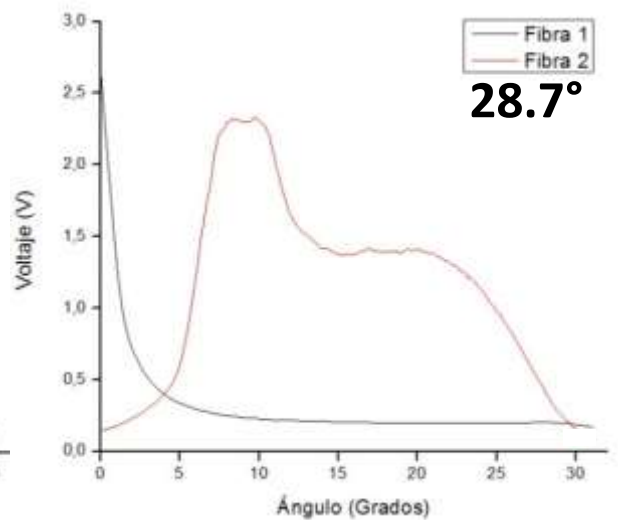


Figura 5.15 Superficie cóncava de radio 4.6 cm (voltaje externo).

Como es visto en las gráficas de Figuras 5.14 y 5.15, tienen un comportamiento que no es favorable para determinar algún ángulo requerido, por lo que se descarta para próximas pruebas esta superficie reflectora.

Se cambiaron las bases con diferentes radios de curvatura y ahora considerar para las próximas pruebas un voltaje externo para el fotodiodo. Así que se visualizan en las gráficas de las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18.

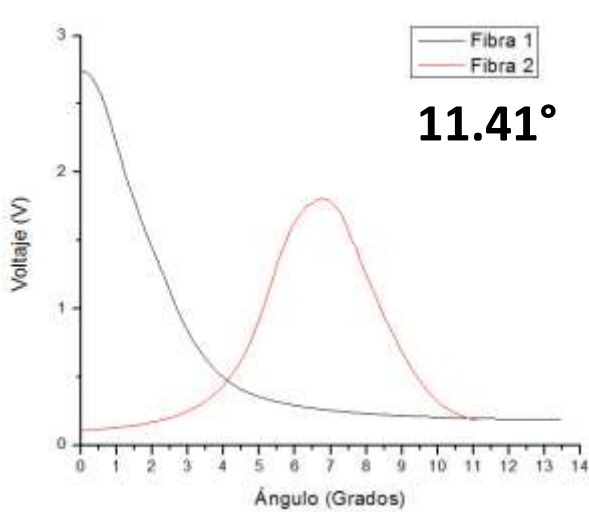


Figura 5.16 Superficie cóncava de radio 31.29 cm prototipo 3.1.

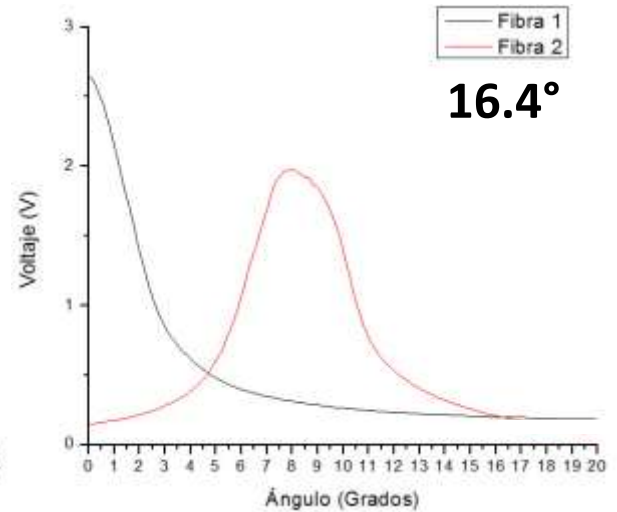


Figura 5.17 Superficie cóncava de radio 10.56 cm prototipo 3.1.

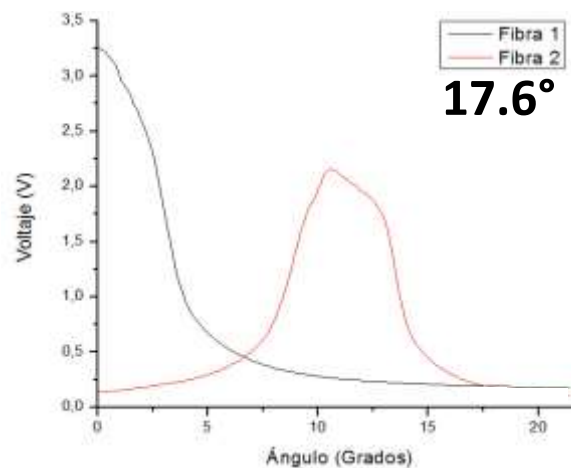


Figura 5.18 Superficie cóncava de radio 6.52 cm prototipo 3.1.

Para el prototipo 3.1 se ajustarán las distancias de las fibras ópticas y el punto de inclinación, esto con el fin de obtener un mayor ángulo de operación, además de reducir las dimensiones del prototipo 3.1.

5.4 Diseño de Prototipo 3.2

El prototipo 3.2 (Figura 5.19), se muestra señalado los cambios propuestos anteriormente (distancias de las fibras ópticas y el punto de inclinación).

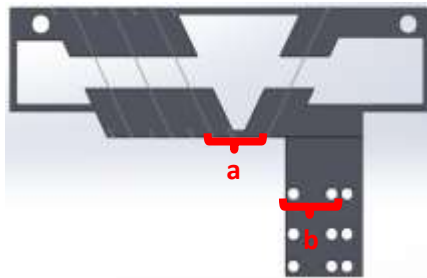


Figura 5.19 Prototipo 3 en Solidworks. a) Ajuste de distancia en las fibras ópticas (emisora y receptora). b) Ajuste en la posición de zona reflejante.

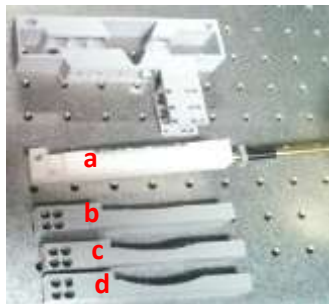


Figura 5.20 Superficies reflectoras del prototipo 3.2 a) Plana b) Cóncava (radio 31.29 cm) c) Cóncava (radio 10.56 cm) d) Cóncava (radio 6.52 cm).



Figura 5.21 Prototipo 3.2 en funcionamiento en la superficie plana.

En las gráficas de la Figuras 5.22, 5.23, 5.24 y 5.25, es mostrado el comportamiento y ángulo de operación de cada superficie reflectora.

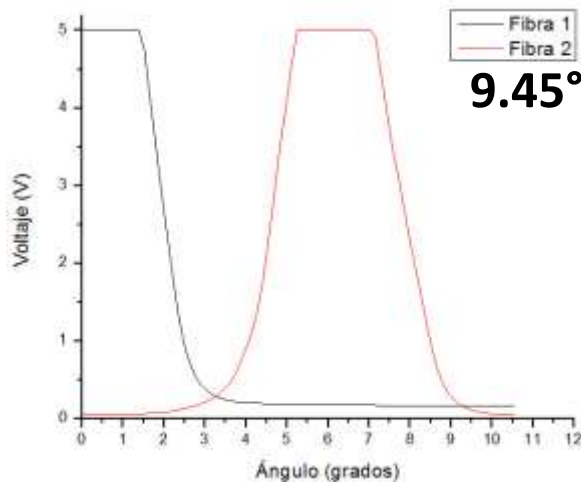


Figura 5.22 Superficie plano prototipo 3.2.

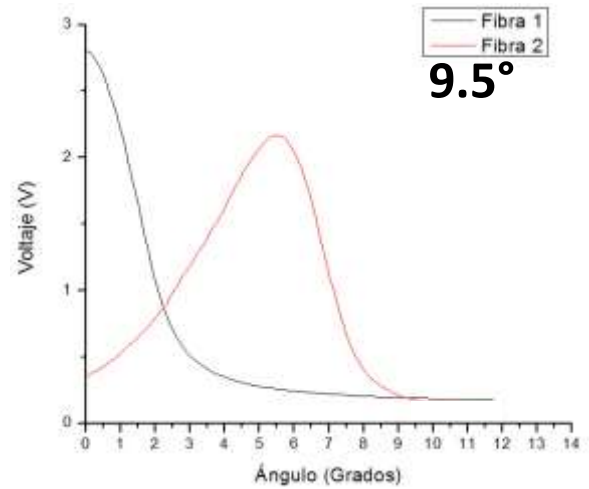


Figura 5.23 Superficie cóncava de radio 31.29 cm prototipo 3.2.

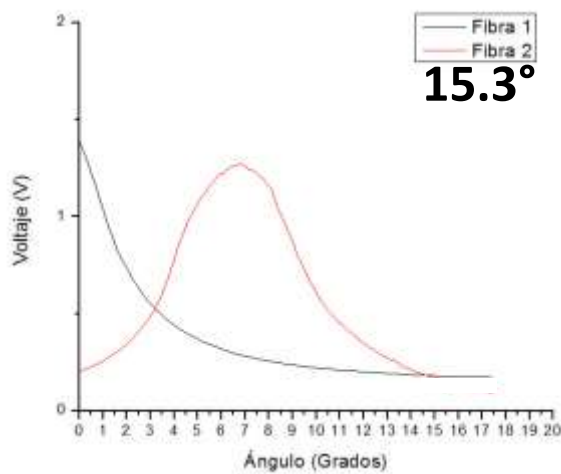


Figura 5.24 Superficie cóncava de radio 10.56 cm prototipo 3.2.

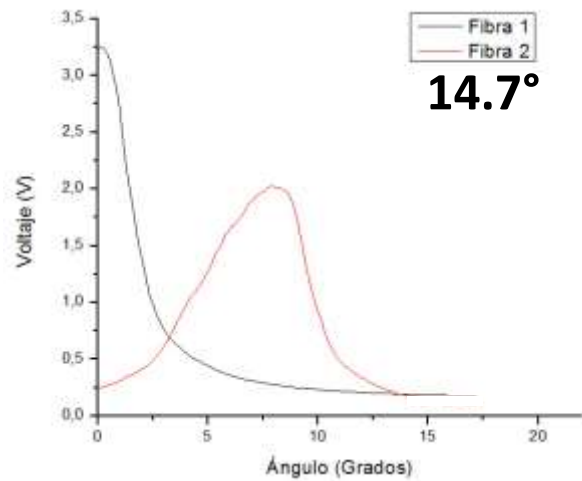


Figura 5.25 Superficie cóncava de radio 6.52 cm prototipo 3.2.

Se obtuvo una mejoría en lo que respecta el ángulo de operación (incremento), pero se desea aún un tamaño más compacto, por lo que se sugiere modificar las distancias entre la superficie reflectora y las fibras ópticas emisora y receptora para el diseño de otro prototipo.

5.5 Diseño de Prototipo 4

Para este nuevo prototipo (Figura 5.26) se realizaron varias consideraciones como son:

- Superficie reflectora (forma plana o cóncava)
- Distancia entre superficie reflectora y POF emisora y receptora (afecta la potencia y la distancia focal de la lente)
- Posición de las POF (distancia y el ángulo de cada POF)
- Posición del punto de inclinación (si es cercano a la superficie reflectora, el ángulo aumenta, pero si fuera lejano, el ángulo es menor).

Preferencia que sea de tamaño pequeño y de un ángulo mayor.

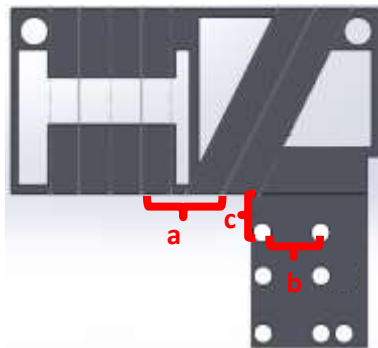


Figura 5.26 Prototipo 4 en Solidworks. a) Ajuste de distancia en las fibras ópticas (emisora y receptora) b) Ajuste en la posición de zona reflejante. c) Ajuste de distancia fibras y zona reflejante.

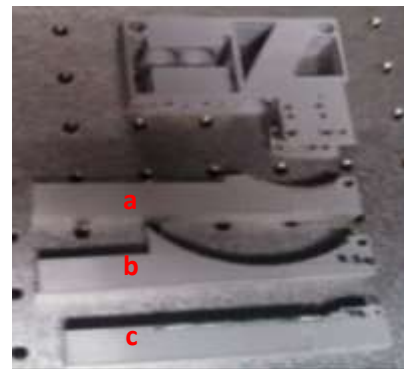


Figura 5.27 Superficies reflectoras del Prototipo 4. a) Cóncava (radio 3 cm) b) Cóncava (radio 5 cm) c) Plana.

A continuación se muestran las gráficas (Figuras 5.28, 5.29 y 5.30) de ángulo de operación y comportamiento de las superficies reflectoras para el prototipo 4.

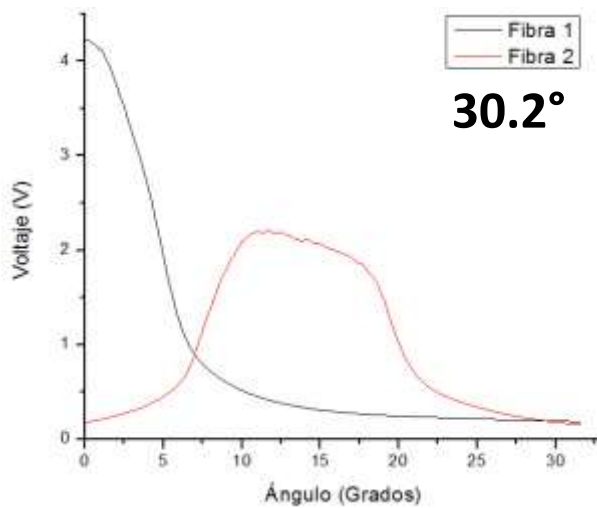


Figura 5.28 Superficie cóncava de radio 3 cm prototipo 4.

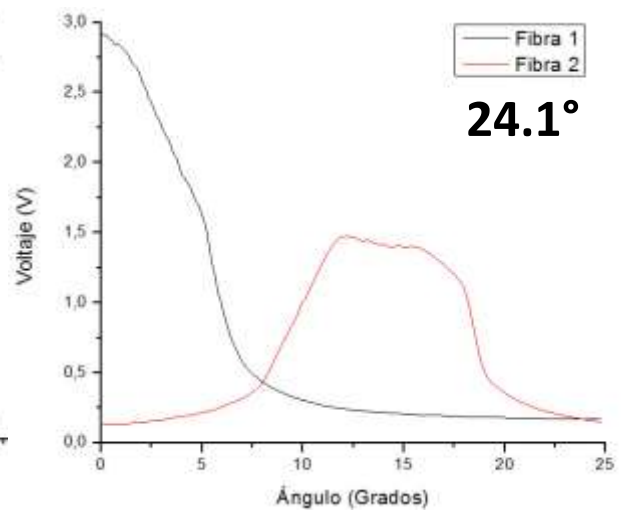


Figura 5.29 Superficie cóncava de radio 5 cm prototipo 4.

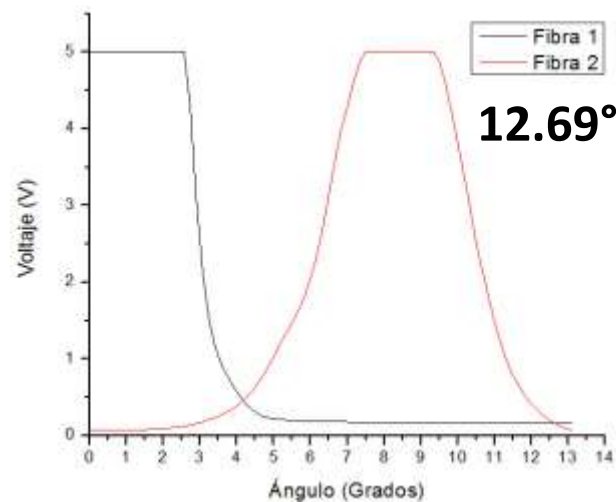


Figura 5.30 Superficie plana prototipo 4.

Se obtuvieron mejores resultados en lo que respecta el ángulo de operación en comparación de los anteriores prototipos con sus respectivas superficies reflectoras, así que en la siguiente sección se mostrará una tabla comparativa de los prototipos diseñados con sus características de diseño.

5.6 Tabla comparativa de prototipos 2, 3.1, 3.2 y 4

Prototipo	2	3.1	3.2	4
Distancia Fibra emisora-receptora (I)	3 cm	1.7 cm	1.2 cm	1.2 cm
Distancia Fibras - Zona reflectora (II)	3 cm	3 cm	1.76 cm	1.76 cm
Distancia Punto de inclinación - Zona reflectora (III)	3.6 cm	3.6 cm	3.6 cm	0.7 cm
Superficie reflectora	a) Plano b) Cóncavo radio 3 cm c) Cóncavo radio 4.6 cm	d) Plano e) Cóncavo radio 31.29 cm f) Cóncavo radio 10.56 cm g) Cóncavo radio 6.52 cm	h) Plano i) Cóncavo radio 31.29 cm j) Cóncavo radio 10.56 cm k) Cóncavo radio 6.52 cm	l) Plano m) Cóncavo radio 5 cm n) Cóncavo radio 3 cm
Ángulo	a) 6.75° b) 17.47° c) 12.06°	d) 10.81° e) 11.81° f) 16.5° g) 17.5°	h) 9.45° i) 9.5° j) 15.3° k) 14.7°	l) 12.69° m) 24.1° n) 30.8°

Tabla 5.1. Comparación de características de prototipos 2, 3.1, 3.2 y 4.

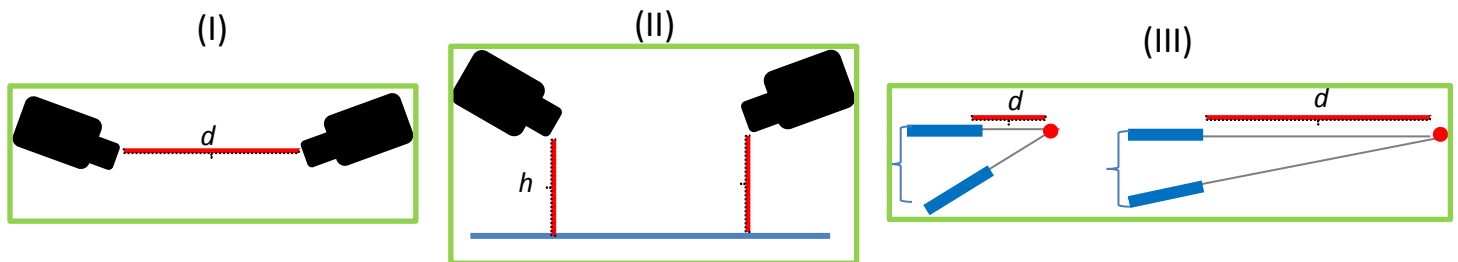


Figura 5.31 Ilustraciones de los ajustes a los prototipos I) Distancia entre Fibras ópticas (emisora y receptora). II) Distancia entre Fibras ópticas y zona reflejante. III) Distancia del punto de inclinación y zona reflejante.

Por lo tanto, en la Tabla 5.1 se determina que el prototipo con las mejores condiciones para el sensor de nivel óptico, es el **Prototipo 4 con una superficie cóncava de radio 3 cm, ya que presenta un rango de operación (ángulo) de 30.8°.**

5.7 Uso de lente cilíndrica

Para mejorar el ángulo del prototipo 4 en una superficie reflectora cóncava de radio 3 cm, se tuvo la idea de mejorar la señal de iluminación (haz de luz) de la emisión de la fibra óptica emisora, por lo que cuando se trabajaba con una lente esférica se tenía como resultado un haz en forma de spot, vista en la Figura 5.32, en la que se concentraba la intensidad de luz en una región determinada (circulo). De tal forma, se optó por usar una lente cilíndrica, obtenida de un módulo led laser de línea ajustable, la cual nos proporciona un haz de forma lineal y así la intensidad de luz tiene una región mayor en comparación de un haz spot, vista en la Figura 5.33.



Figura 5.32 Comportamiento del haz en una lente esférica (spot).



Figura 5.33 Comportamiento del haz en una lente cilíndrica (lineal).

Se hacen pruebas nuevamente con el prototipo 4 tomando en cuenta sus respectivas superficies reflectoras pero con el uso de la lente cilíndrica.

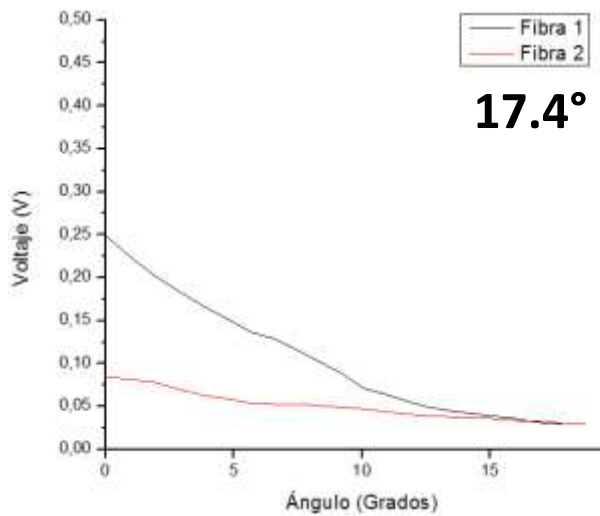


Figura 5.34 Superficie plana prototipo 4 (lente cilíndrica).

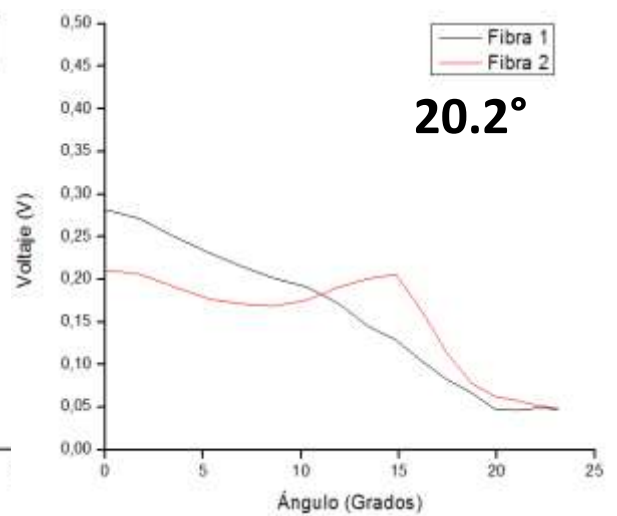


Figura 5.35 Superficie cóncava de radio 5 cm prototipo 4 (lente cilíndrica).

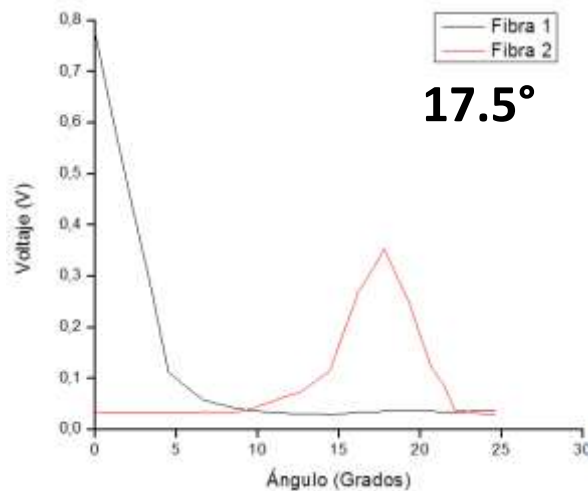


Figura 5.36 Superficie Cóncava de radio 3 cm (Distancia de 1.76 cm en Zona reflejante – Fibras ópticas) prototipo 4 (lente cilíndrica).

Ajuste de altura en la zona reflectora a las fibras.

Anteriormente se estaba trabajando con 1.76 cm de la altura (zona reflejante a fibras ópticas) por lo que al observar el comportamiento de las anteriores superficies, fue utilizada la pieza reflejante cóncava de radio 3 cm, ya que

brindo una mejor respuesta en lo que respecta el rango de operación (ángulo) para las pruebas. Por lo que la gráfica anterior (Figura 5.36), es posible ajustar la distancia (más pequeña la distancia) de la zona reflejante respecto a las fibras ópticas emisora y receptora, para conocer el comportamiento que se podría observar por este último ajuste.

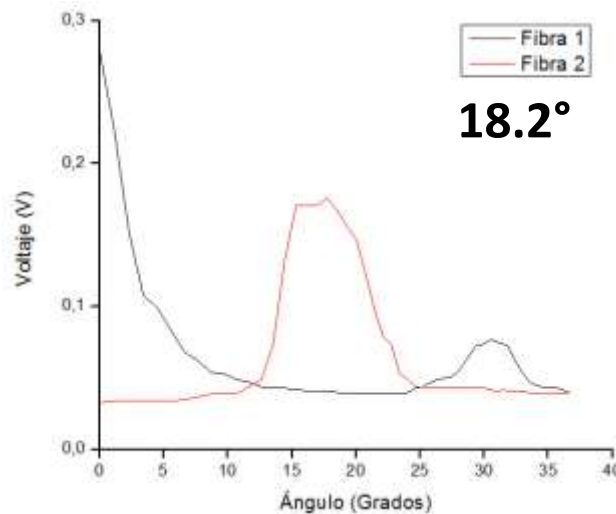


Figura 5.37 Superficie cóncava de radio 3 cm (Distancia de 1 cm zona reflejante – Fibras ópticas) prototipo 4 (lente cilíndrica).

En esta gráfica (Figura 5.37), considerando la señal de la Fibra 1, se observa que al llegar a un nivel de voltaje mínimo, se mantiene estable, pero al aumentar el ángulo empieza a aumentar un poco el nivel de voltaje y decae de nuevo, por lo que sería complicado considerar este tipo de comportamiento para el uso del ángulo máximo del sensor de nivel.

De acuerdo a lo visto en el uso de la lente cilíndrica en el prototipo 4, se amplía el ángulo de operación con una sola fibra óptica receptora, por lo que se examinó en realizar un prototipo modular, ya que brindaría la facilidad de ajustar las distancias entre las diferentes consideraciones que se han hecho en los prototipos (mencionadas en la Tabla 5.1).

5.8 Prototipo 5 modular

Ahora al observar que el uso de una lente cilíndrica (haz lineal) se obtiene una región más grande de luz, por lo que las fibras ópticas pueden captar más la intensidad de luz, aunque como fue visto en las gráficas anteriores, Figuras 5.33, 5.34, 5.35 y 5.36, la segunda fibra utilizada tiene un comportamiento poco favorable para las mediciones, lo cual se despreciará para este prototipo, además que presenta la limitante de una disminución de voltaje (V a mV).

En el prototipo modular, son divididas en diferentes piezas, éstas son descritas en la Figura 5.38. Además se realizan pruebas con una zona reflejante cóncava de radio 5.5 cm y la superficie plana.

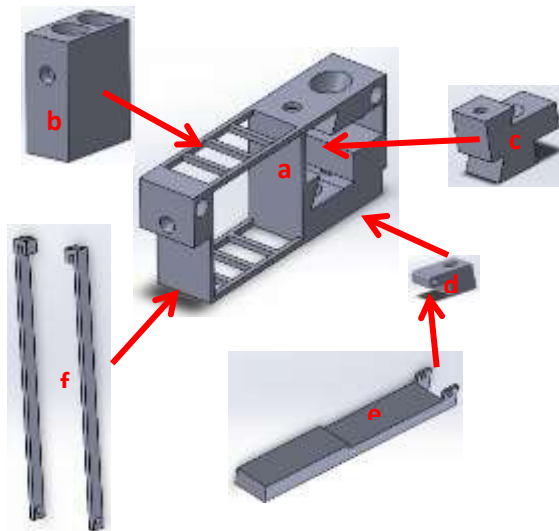


Figura 5.38 Prototipo 5 modular en Solidworks. A) Cuerpo. B) Soporte para Fibras ópticas receptoras. C) Pieza de distancia focal de lente cilíndrica. D) Pieza de altura (Cuerpo-Superficie reflejante). E) Superficie reflectora. F) Soportes de superficies reflectoras.

En las Figuras 5.41 y 5.42, son mostradas las gráficas de operación del prototipo 5 modular.



Figura 5.39 Prototipo 5 modular en funcionamiento con la superficie reflectora plana (espejo).



Figura 5.40 Superficies reflectora cóncava de radio 2.25 cm.

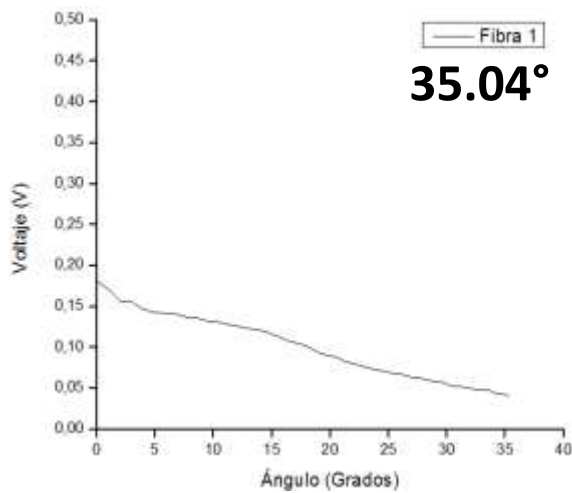


Figura 5.41 Superficie plana (lente cilíndrica) prototipo 5.

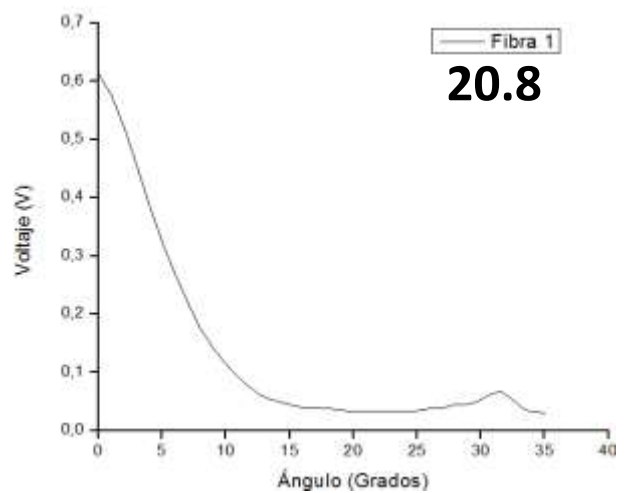


Figura 5.42 Superficie cóncava radio 2.5 cm (lente cilíndrica) prototipo 5.

En una superficie plana se observa un comportamiento más lineal y aumenta más el ángulo de operación, en cambio para una superficie cóncava no se logra aumentar mucho el rango. Aunque para ambos casos el voltaje es bajo, inferior a 1 V y llegando hasta 50 mV como voltaje mínimo de operación.

5.9 Tabla comparativa (con lente cilíndrica) en prototipos 4 y 5

Prototipo	4 (haz lineal)	5 (haz lineal)
Distancia Fibra emisora-receptora (I)	1.2 cm	1 cm
Distancia Fibras-Zona reflectora (II)	1.76 cm 1 cm	0.75 cm
Distancia Punto de inclinación - Zona reflectora (III)	0.7 cm	0.25 cm
Superficie reflectora	a) Plano b) Cóncavo radio 5 cm c) Cóncavo radio 3 cm	d) Plano e) Cóncavo radio 2.5 cm
Ángulo	a) 17.4° b) 30.2° c) 15.2° 22.11°	d) 35.04° e) 20.8°

Tabla 5.2 Comparación de características de prototipos 4 y 5 con uso de lente cilíndrica.

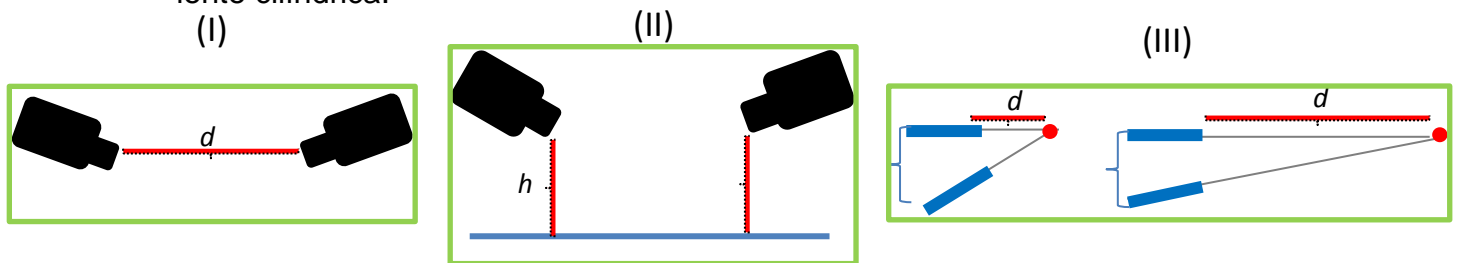


Figura 5.43 Ilustraciones de los ajustes a los prototipos I) Distancia entre Fibras ópticas (emisora y receptora). II) Distancia entre Fibras ópticas y zona reflejante. III) Distancia del punto de inclinación y zona reflejante.

Ahora al comparar cada superficie reflectora, la que brinda con un mejor rango de operación (ángulo), es la **superficie plana con el uso de una lente cilíndrica (haz lineal), alcanzando 35.04° de operación.** Un aspecto

importante de mencionar son las distancias de cada consideración (Figura 5.43), ya que son el límite mínimo del prototipo propuesto, lo que significa que es lo más compacto posible.

5.10 Pruebas del prototipo con mejores condiciones de trabajo

Para llevar a cabo más pruebas con el prototipo 5 con superficie plana, se observó previamente en la Figura 5.41, que el nivel de voltaje es muy bajo (mV), por lo que es necesario acondicionar la señal para visualizar el voltaje, así que fue necesario utilizar un amplificador operacional para incrementar el nivel de voltaje y obtener una mejor resolución (mínimo valor detectable), esto con una ganancia de 9.8 aproximadamente dada por el amplificador operacional.



Figura 5.44 Circuito amplificador con el LM324 con ganancia de 9.8.

Así que al usar el amplificador operacional, se incrementa el nivel de voltaje del sensor y es posible visualizar el comportamiento del prototipo 5. Ahora, en las pruebas son consideradas tres mediciones para observar el comportamiento de la señal.

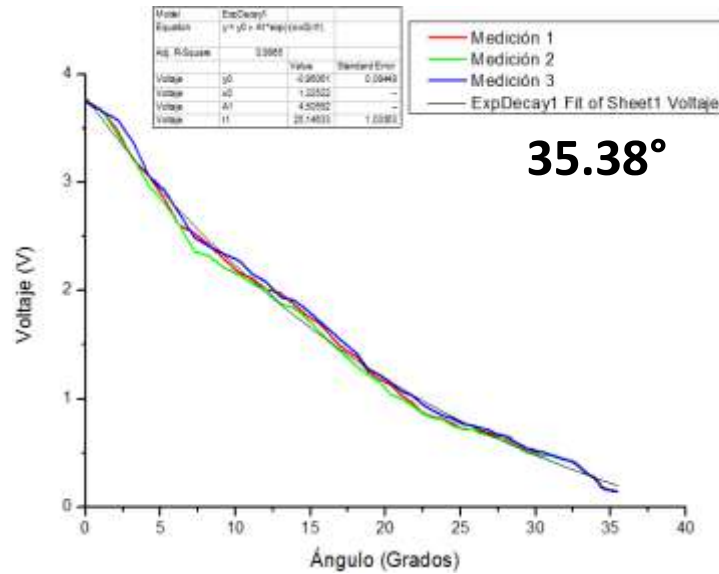


Figura 5.45 Comportamiento de la señal Voltaje – Ángulo en la superficie plana con lente cilíndrica en Prototipo 5.

Son descritas a continuación las características obtenidas del prototipo 5:

- Ángulo de 35.38°.
- Altura de 8.06 cm (tamaño de superficie reflectora de 11 cm).
- Voltaje de operación de 142 mV – 3.75 V.

5.11 Comparación del valor real respecto a la ecuación generada por el software Origin.

$$y = y_0 + A_1 \cdot e^{\left(-\frac{(x-x_0)}{t_1}\right)}.$$

(ecuación 5.1)

Valores de la ecuación (ángulo):

$$y_0 = -0.96061.$$

$$x_0 = 1.32522.$$

$$A_1 = 4.50592.$$

$$t_1 = 25.14633.$$

$$y_0 = \text{valor de ángulo.}$$

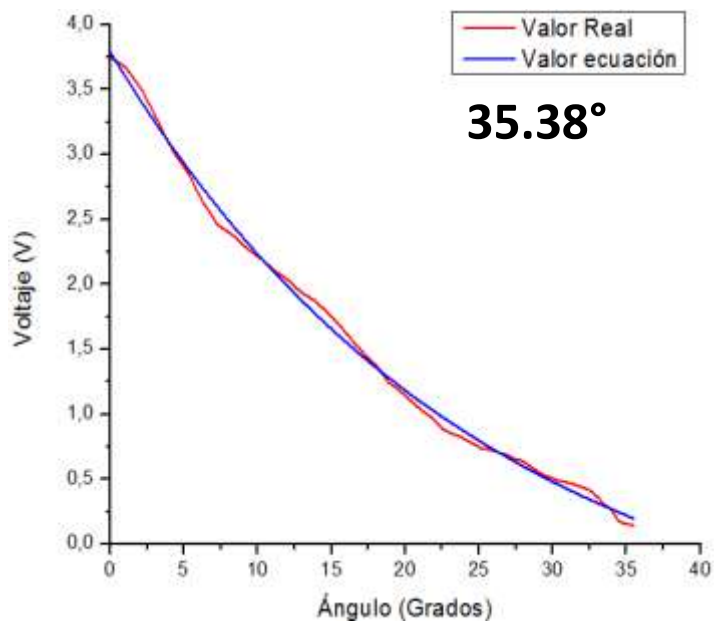


Figura 5.46 Comparación se señal real respecto a la ecuación generada por el software Origin en ángulo.

5.12 Comparación de las Tarjetas de adquisición de datos (Arduino VS DAQ NI)

Para averiguar si la tarjeta de adquisición de datos nos es útil para las mediciones son realizadas pruebas con las tarjetas Arduino UNO y DAQ NI (USB 6003), esto con el fin de conocer la resolución de cada tarjeta.



Figura 5.47 Tarjeta DAQ NI y Tarjeta Arduino UNO.

Para realizar las pruebas preliminares, se consideró las mediciones en una zona del rango de operación, en este caso de 15.65° hasta 21.07° .

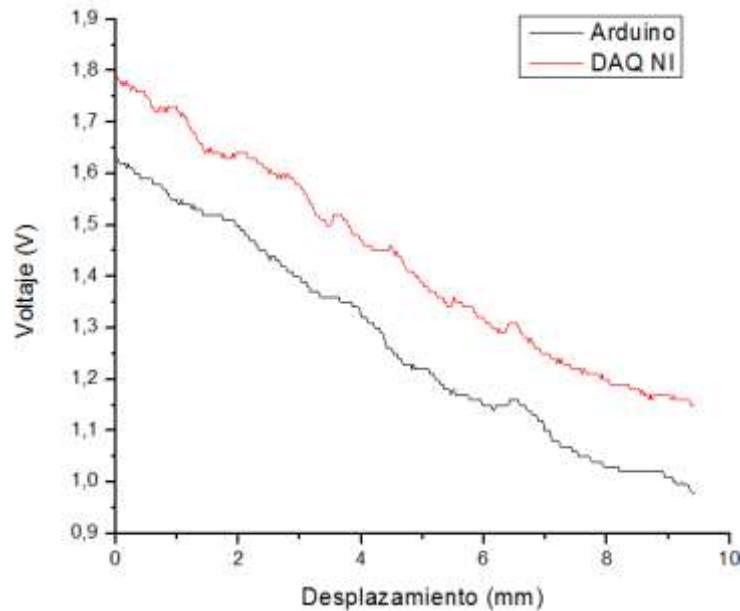


Figura 5.48 Gráfica de voltaje respecto a un desplazamiento de 0.0254 mm comprendido en un rango de operación (15.65° a 21.07°).

Tarjeta	Arduino UNO	DAQ NI
Corriente	26.1 mA	28 mA
Resolución	0.1353 mm/mV	0.08779 mm/mV

Tabla 5.3 Comparación de Tarjeta Arduino y DAQ NI.

Se obtiene un incremento en la corriente de bombeo para el diodo laser con el uso de la tarjeta de NI, por lo que en la gráfica de la Figura 5.48, la señal se incrementa y además dicha tarjeta puede detectar cambios de voltaje más pequeños, esto debido que la tarjeta DAQ NI tiene mayor resolución en el ADC (convertidor analógico-digital) que la Arduino UNO (NI: 16 bits y Arduino: 10 bits).

5.13 Discusión

Se describen las condiciones que se observaron al ajustar las fibras ópticas (emisora y receptora), el uso de lentes colocadas en la fibra emisora para evitar que la luz se dispersara, la posición de inclinación de la superficie reflectora. También es añadido los trazos de rayos (óptica geométrica) de los prototipos propuestos, esto con el objetivo de visualizar la proyección del haz. Y por último se presenta una tabla general comparativa de los prototipos diseñados con sus valores de operación (ángulo y distancia) además de su comportamiento descrito en gráfica y comentarios de los prototipos..

Fibras ópticas (inclinación)

- Mayor inclinación:
 - Distancia de cada fibra es mayor.
 - Mayor potencia.

- Menor inclinación:
 - Distancia de cada fibra es menor.
 - Menor potencia.

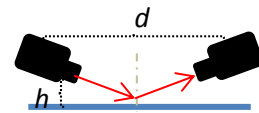


Figura 5.49 Inclinación mayor de fibras ópticas.

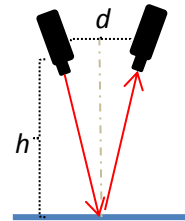


Figura 5.50 Inclinación menor de fibras ópticas.

Lentes

- Esférica (mayor voltaje, 2 fibras ópticas receptoras).
- Cilíndrica (menor voltaje, 1 fibra receptora).

Posición de inclinación

- Cercano a la zona reflejante (mayor ángulo y altura).
- Lejano a la zona reflejante (menor ángulo y altura).



Figura 5.51 Zona reflejante
a) Cercano b) Lejano.

5.13.1 Trazo de rayos de los prototipos diseñados

Prototipo 2

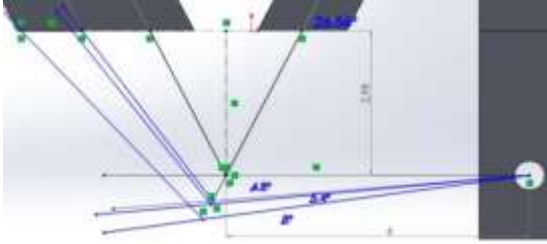


Figura 5.52 Superficie plana prototipo 2.

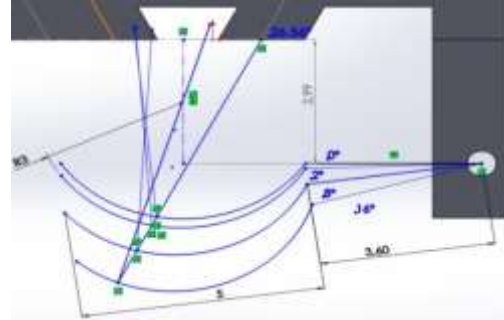


Figura 5.53 Superficie cóncava radio 3 cm prototipo 2.

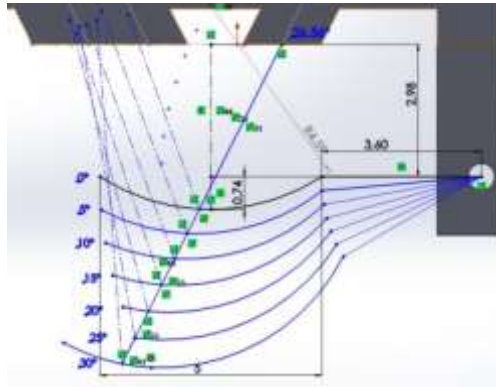


Figura 5.54 Superficie cóncava radio 4.6 cm prototipo 2.

Prototipo 3

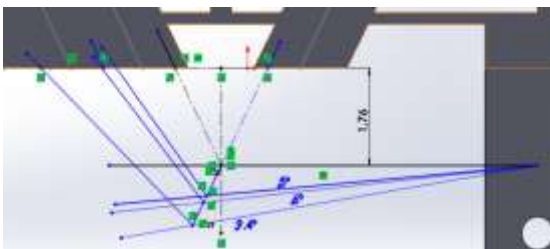


Figura 5.55 Superficie plana prototipo 3.

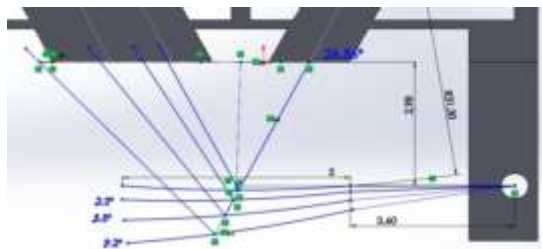


Figura 5.56 Superficie cóncava radio 31.3 cm prototipo 3.

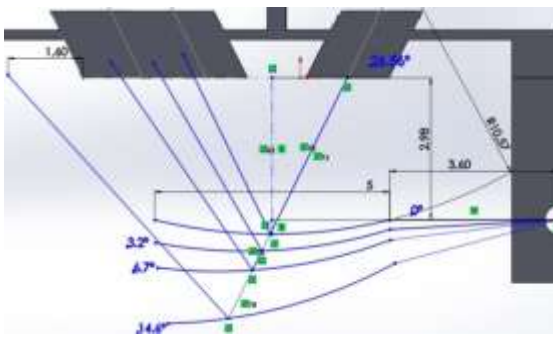


Figura 5.57 Superfície côncava
radio 10.57 cm prototipo 3.

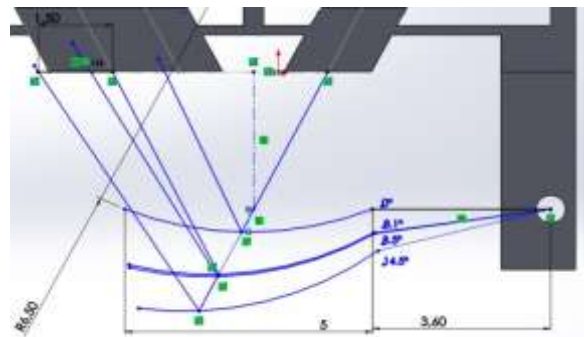


Figura 5.58 Superfície côncava
radio 6.5 cm prototipo 3.

Prototipo 4

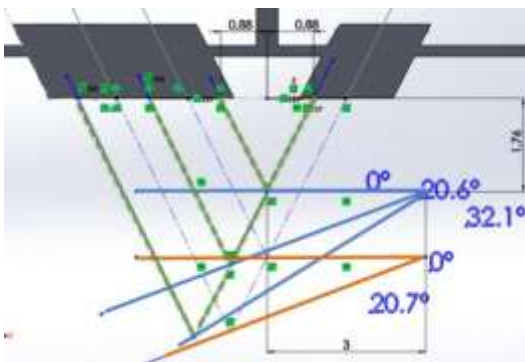


Figura 5.59 Superfície plana prototipo
4.

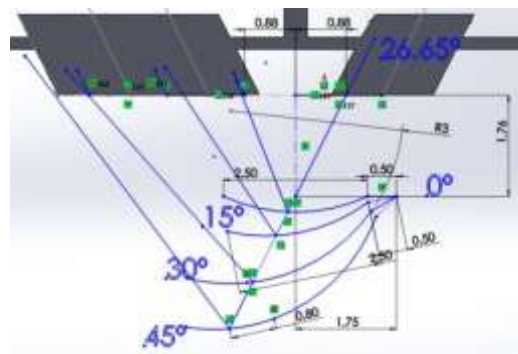


Figura 5.60 Superfície côncava
radio 3 cm prototipo 4.

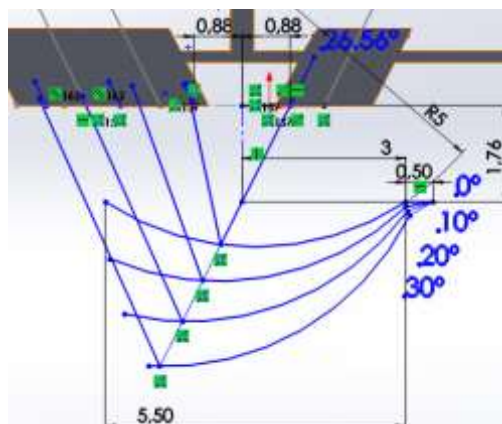


Figura 5.61 Superfície côncava radio 5 cm prototipo 4.

Prototipo 5

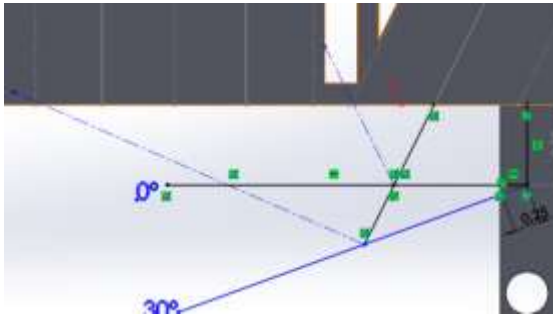


Figura 5.62 Superficie plana prototipo 5.

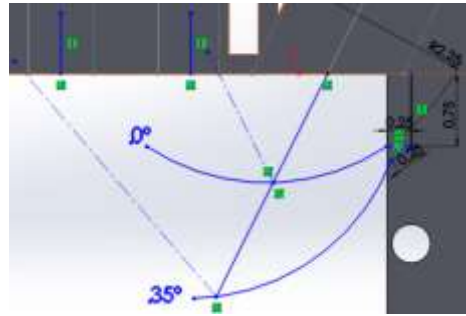
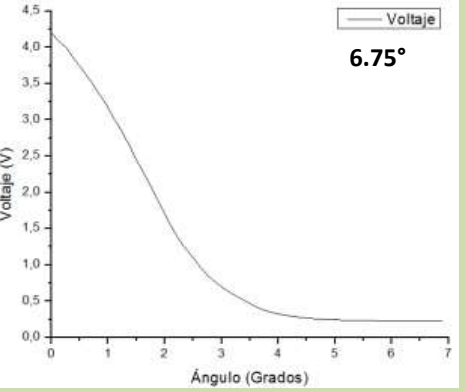
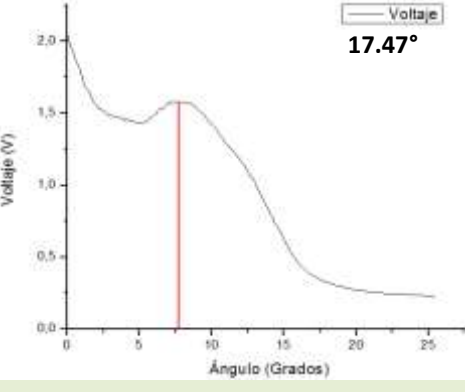
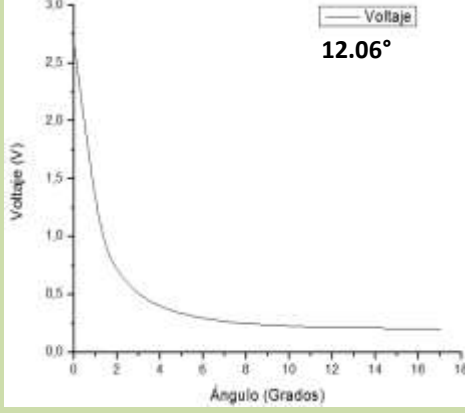


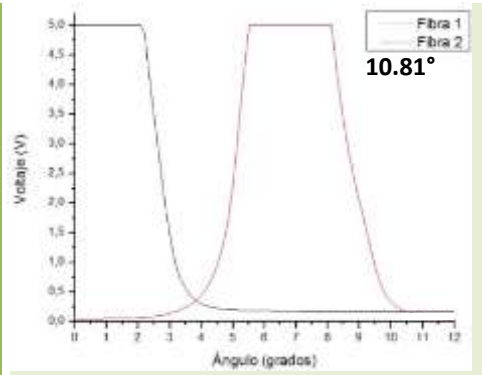
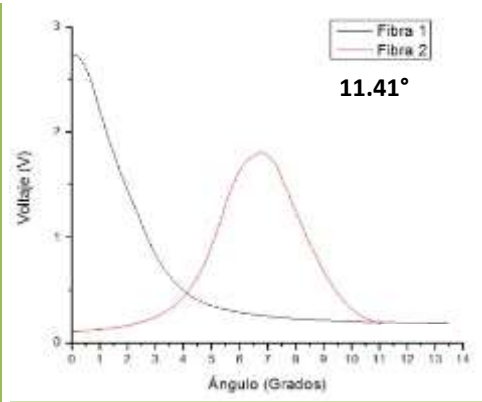
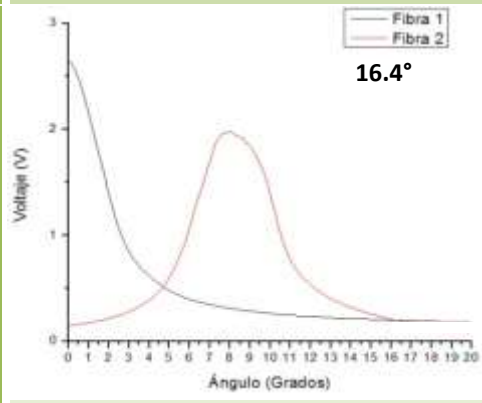
Figura 5.63 Superficie cóncava radio 2.25 cm prototipo.

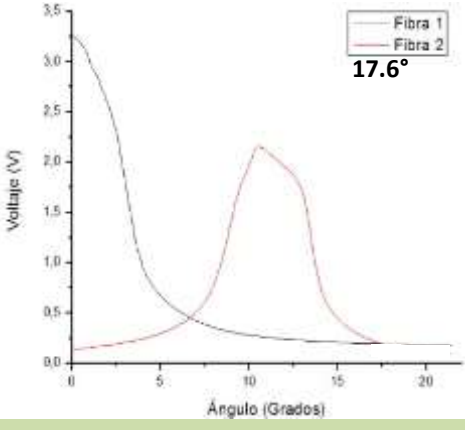
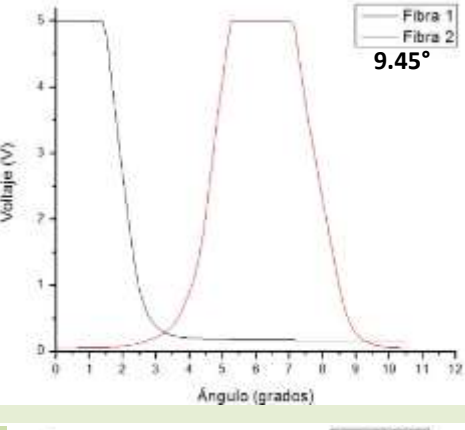
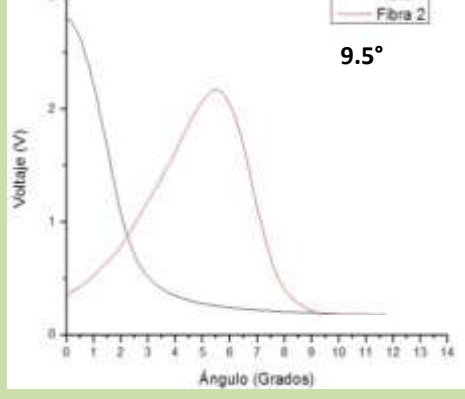
Cada trazo de rayos fue realizado con el software de Solidworks, tomando en cuenta que al momento de realizar el diseño del cuerpo del sensor, se propuso en trazar los rayos desde la ubicación de la fibra emisora, esto con el fin de conocer el trayecto que tendría el rayo reflejado en las diferentes superficies reflectoras. Así que, con las consideraciones mencionadas en las Tablas 5.1 y 5.2, además de la ley de reflexión en superficies planas y cóncavas, se logró visualizar el comportamiento de cada rayo y así tener los casos ideales de los rayos recibidos hacia la(s) fibra(s) emisora(s). Ya que con esto, permitiría realizar las impresiones de cada prototipo.

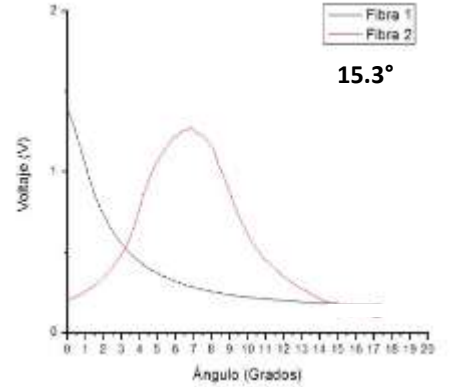
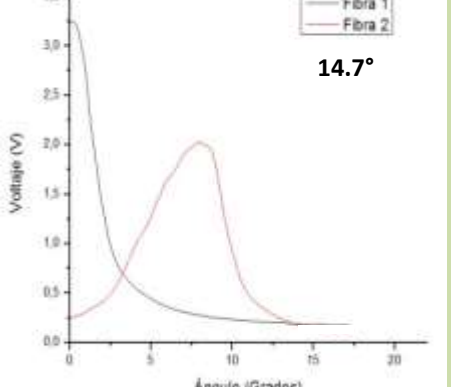
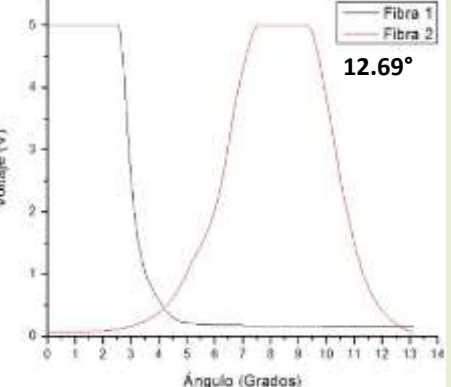
5.13.2 Tabla comparativa general de los prototipos

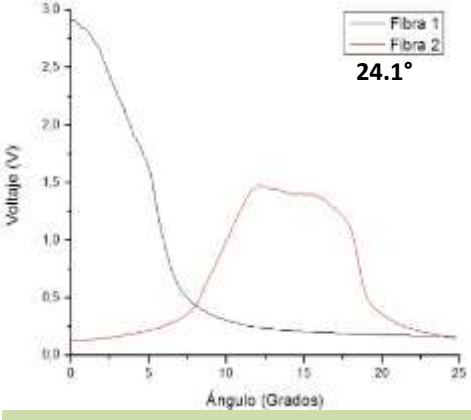
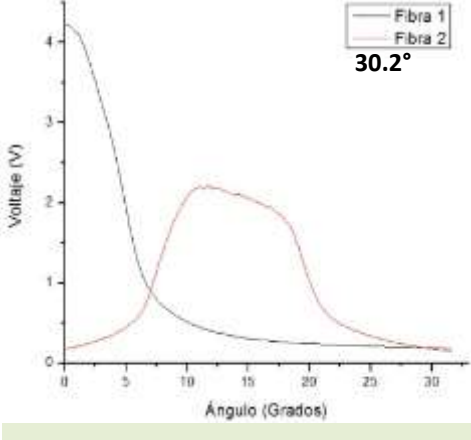
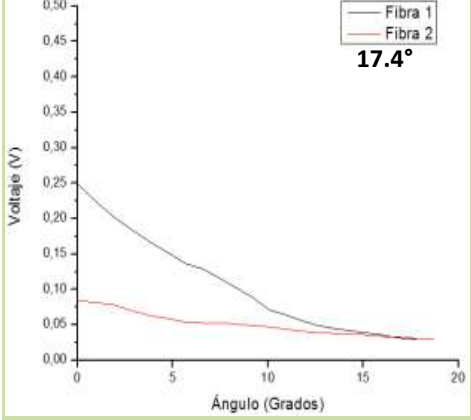
Como último punto de discusión se presenta la Tabla 5.4 que detalla las características de valores de operación, gráficas y comentarios al respecto del comportamiento cada prototipo diseñado.

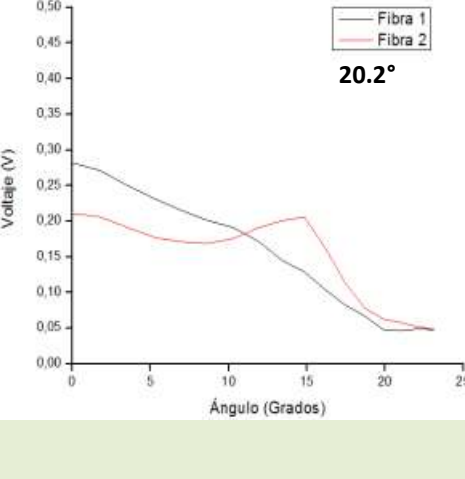
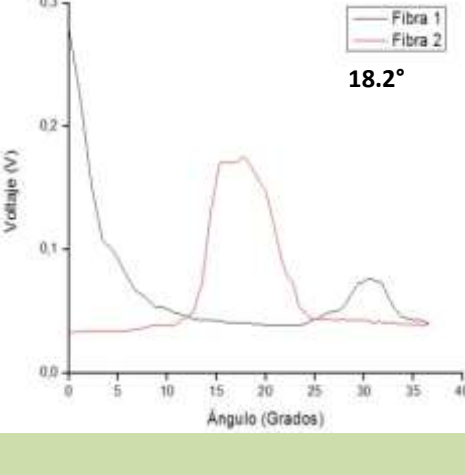
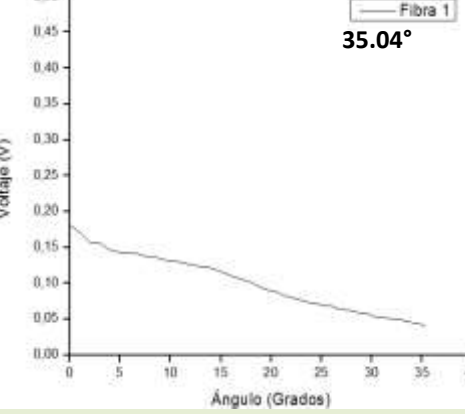
Prototipo - Superficie reflectora (lente)	Gráfica (ángulo de operación)	Distancia de operación	Comentarios
Prototipo 2 – Plano (lente esférica)	 <p>Voltaje (V)</p> <p>Ángulo (Grados)</p> <p>Voltaje</p> <p>6.75°</p>	1.3 cm	<p>Si se desea operar en distancias cortas (mm) este prototipo proporciona una caída (limpia y sin variaciones) que se podría ajustar en 3 grados de operación y en distancia sería de 6 mm.</p>
Prototipo 2 - Cóncavo radio 3 cm (lente esférica)	 <p>Voltaje (V)</p> <p>Ángulo (Grados)</p> <p>Voltaje</p> <p>17.47°</p>	3.46 cm	<p>En este prototipo está presente una zona que no es buena para la medición del sensor, llamada zona muerta que operaría a 7.5° con una distancia de 14 mm.</p>
Prototipo 2 - Cóncavo radio 4.6 cm (lente esférica)	 <p>Voltaje (V)</p> <p>Ángulo (Grados)</p> <p>Voltaje</p> <p>12.06°</p>	2.35 cm	<p>La caída de voltaje es más pronunciada en un ángulo de 2°, por lo que se podría trabajar a 4 mm de distancia.</p>

<p>Prototipo 3.1 – Plano (lente esférica)</p>	 <p style="text-align: right;">10.81°</p>	<p>2.1 cm</p>	<p>En este caso son utilizadas 2 fibras ópticas, a pesar que tienen una forma igual, se satura en específicas zonas, por lo que en pruebas reales no se podría determinar en qué rango de operación estaría trabajando el sensor.</p>
<p>Prototipo 3.1 – Cóncavo radio 31.29 cm (lente esférica)</p>	 <p style="text-align: right;">11.41°</p>	<p>2.21 cm</p>	<p>Continúa el uso de 2 fibras ópticas para ampliar el rango de operación. Es importante considerar que el nivel de voltaje alto de la fibra 2, debe corresponder a un nivel de voltaje bajo (el mínimo y que pueda ser detectado por la tarjeta Arduino) de la fibra 1.</p>
<p>Prototipo 3.1 – Cóncavo radio 10.56 cm (lente esférica)</p>	 <p style="text-align: right;">16.4°</p>	<p>3.23 cm</p>	<p>Se considera el nivel de voltaje alto de la fibra 2, pues corresponde a un nivel de voltaje bajo (el mínimo que pueda ser detectado por la tarjeta) de la fibra 1. Al no llegar a al valor, se considera una condición de si es menor tal voltaje, considere la medición de la fibra 2.</p>

<p>Prototipo 3.1 – Cóncono radio 6.52 cm (lente esférica)</p>		<p>3.48 cm</p>	<p>Mejora el rango de operación (ángulo) en comparación de los casos anteriores (prototipo 3.1), aunque debe considerarse la situación de las fibras 1 y 2, como fue descrita en los anteriores casos.</p>
<p>Prototipo 3.2 – Plano (lente esférica)</p>		<p>1.83 cm</p>	<p>Presenta similitud en las condiciones comentadas antes (prototipo 3.1 – plano), pero se disminuye el rango de operación (ángulo y distancia).</p>
<p>Prototipo 3.2 – Cóncono radio 31.29 cm (lente esférica)</p>		<p>1.84 cm</p>	<p>Disminuye el rango de operación (ángulo y distancia) en comparación del prototipo 3.1 – cóncono radio 31.29 cm. Se puede observar que la fibra 2, se desplazó hacia un ángulo menor.</p>

<p>Prototipo 3.2 – Cóncono radio 10.56 cm (lente esférica)</p>	 <p style="text-align: center;">15.3°</p>	<p>3 cm</p>	<p>El nivel de voltaje en la fibra 1 disminuye (cercano al nivel de la fibra 2), por lo que genera en la fibra 1 un comportamiento logarítmico y bajó el rango de operación en comparación del prototipo 3.1 – cóncono radio 10.56 cm.</p>
<p>Prototipo 3.2 – Cóncono radio 6.52 cm (lente esférica)</p>	 <p style="text-align: center;">14.7°</p>	<p>2.88 cm</p>	<p>La caída de voltaje es más pronunciada hasta antes de llegar a los 5° y en comparación del prototipo 3.1 – cóncono radio 6.52 cm baja el rango de operación y señal de la fibra 2 es desplazada hasta un nivel de voltaje bajo de la fibra 1.</p>
<p>Prototipo 4 – Plano (lente esférica)</p>	 <p style="text-align: center;">12.69°</p>	<p>2.47 cm</p>	<p>Se continúa presentado en las superficies planas saturación en el nivel máximo de voltaje, por lo que se presentan en 2 zonas que no se podrían determinar en cual rango está operando (también pueden ser llamadas zonas muertas).</p>

<p>Prototipo 4 – Cóncavo radio 5 cm (lente esférica)</p>		<p>4.92 cm</p>	<p>El rango de operación aumenta a comparación de los prototipos antes mencionados y en la fibra 2 es más ancho el rango (ángulo). Aunque presenta ciertas zonas no favorables para la medición del sensor.</p>
<p>Prototipo 4 – Cóncavo radio 3 cm (lente esférica)</p>		<p>6.4 cm</p>	<p>Para este prototipo se obtuvieron favorables resultados en lo que respecta los rangos de operación y del comportamiento de las señales de cada fibra, y que el nivel máximo de la fibra 2 y el nivel mínimo de la fibra 1 brindan la condición que opere bien el sensor de nivel.</p>
<p>Prototipo 4 – Plano (lente cilíndrica)</p>		<p>3.44 cm</p>	<p>El cambio de la lente afecto bastante el comportamiento de la señal en cada fibra, por lo que en este caso, son lineales las caídas de voltajes. También otro aspecto es la disminución del voltaje llegando a escala de mV.</p>

<p>Prototipo 4 – Cóncavo radio 5 cm (lente cilíndrica)</p>	 <p style="text-align: center;">20.2°</p>	<p>4.04 cm</p>	<p>La segunda fibra tiene un comportamiento no deseado para las pruebas del sensor, así que se descarta y solamente se considera la fibra 1, por lo que es lineal hasta cierto punto, ya que al aumentar el ángulo de inclinación empieza a elevar un poco el voltaje. El nivel de voltaje es muy bajo (mV).</p>
<p>Prototipo 4 – Cóncavo radio 3 cm (lente cilíndrica)</p>	 <p style="text-align: center;">18.2°</p>	<p>3.61 cm</p>	<p>Como fue mencionado el caso anterior (prototipo 4 – cóncavo radio 5cm), la fibra 2 no favorece las pruebas. En el caso de la fibra 1, se visualiza que al llegar a un rango (ángulo) superior a 25°, sube el voltaje y esto no es bueno para el sensor, por eso se estableció que el rango de operación sea de 18.2°</p>
<p>Prototipo 5 – Plano (lente cilíndrica)</p>	 <p style="text-align: center;">35.04°</p>	<p>8.06 cm</p>	<p>Se obtiene un comportamiento lineal del sensor y además el rango de operación es el mayor en comparación de los demás prototipos diseñados y que solo es utilizada una fibra óptica. Aunque continúa el nivel de voltaje muy bajo.</p>

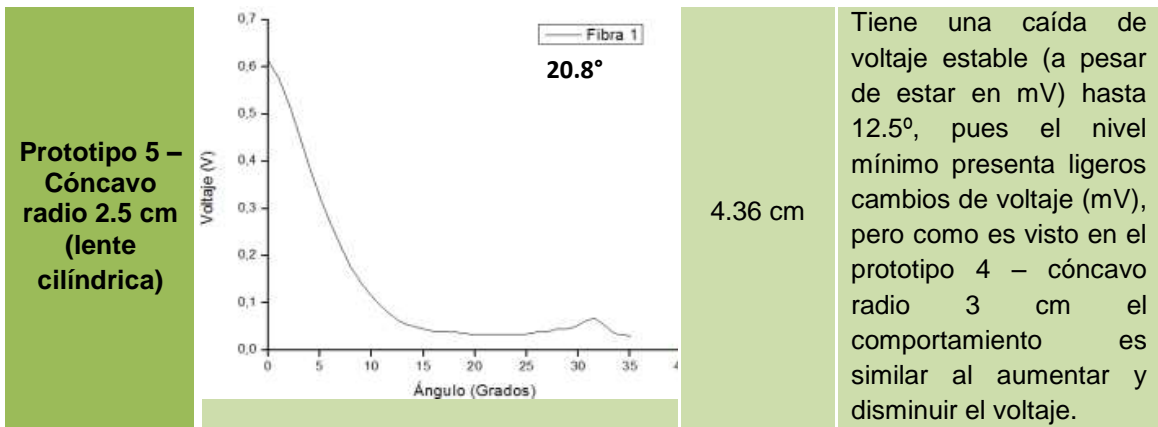


Tabla 5.4 Tabla comparativa final de los prototipos diseñados.

Se presentan las diferentes características de operación de los prototipos diseñados, pero la consideración que es establecida primordial es el tamaño **compacto (pequeño)** del sensor. De los mejores podemos destacar 2 prototipos:

- Prototipo 4 – Cóncavo radio 3 cm (lente esférica)
- Prototipo 5 – Plano (lente cilíndrica)

Cada uno ofrece un rango de operación superior a los prototipos anteriores (*Prototipo 4* ángulo: 30.2° - distancia: 6.4 cm y *Prototipo 5* ángulo: 35.04° - distancia: 8.06 cm). Pero el Prototipo 4 son usados 2 fibras receptoras y el Prototipo 5 solo una fibra, lo que ocasionaría un desarrollo extra de programación en LabVIEW al considerar 2 señales de voltaje, además de que el tamaño es más grande por el uso de una fibra extra. En cambio en el Prototipo 5 se presentan los niveles de voltaje muy bajos, por lo que es necesario utilizar un amplificador para acondicionar la señal, y esto ocasiona el uso de más elementos para el funcionamiento del sensor. Así que en ambos casos se pierde y gana algo para llevar a cabo la implementación del sensor de nivel, por lo que se consideró el tamaño, así que el Prototipo 5 - superficie plana (espejo) con lente cilíndrica, se trabajará para pruebas reales.

CAPÍTULO 6 Conclusiones y recomendaciones

En base a los objetivos particulares presentados para este trabajo se puede comentar que:

Objetivo particular 1

Trazo de rayos de la geometría de la zona reflejante y receptora

- En este punto se analizaron dos tipos de geometrías, cóncava y plana; en la geometría cóncava se analizaron 7 radios diferentes ($r = 2.5$ cm, $r = 3$ cm, $r = 4.6$ cm, $r = 5$ cm, $r = 6.52$ cm, $r = 10.56$ cm y $r = 31.29$ cm), en donde se pudo observar que entre el radio sea mayor a 5 cm el rayo reflejado tiende a desplazarse más rápido y si el radio es menor a 4 cm se desplaza más lento. Para la geometría plana, el haz reflejado se desplaza más rápido que en la superficie cóncava.

Objetivo particular 2

Determinar el diseño para la emisión y detección de la señal

- Los resultados usando una superficie cóncava con 1 fibra receptora ocasiona que el rayo reflejado se desplaza a un ángulo máximo de 15° .
- Los resultados usando una superficie plana con 1 fibra receptora ocasiona que el rayo reflejado se desplaza a un ángulo máximo de 6° .
- Los resultados usando una superficie cóncava con 2 fibras receptoras ocasiona que el rayo reflejado se desplaza a un ángulo máximo de 30° .
- Los resultados usando una superficie plana con 2 fibras receptoras ocasiona que el rayo reflejado se desplaza a un ángulo máximo de 10° .
- El haz de la fibra óptica se dispersa al salir, por lo cual al reflejarse en la superficie esta solo regresa una pequeña parte a la fibra receptora, así que fue utilizado una lente para colimar la mayor cantidad de luz en una

mancha. Así que se mejoró la intensidad de la señal en la fibra receptora, y se logró visualizar mejor el comportamiento de los haces.

- Con el uso de 2 fibras ópticas receptoras, una superficie cóncava y una lente esférica se llegó a obtener un ángulo máximo de 30.2° .
- Con el uso de una fibra óptica receptora, una superficie plana y una lente cilíndrica se llegó a obtener un ángulo máximo de 35.04° .

Objetivo particular 3

Diseñar un circuito de control del emisor y receptor

- En el caso de que el haz no pase por una lente, se dispersa el haz y la señal requerirá una etapa de amplificación, pues el nivel de voltaje es demasiado bajo (10 mV el máximo que se logró visualizar).
- Con la lente esférica la señal es perceptible entre 5 V a 200 mV aproximadamente, pero presenta ruido que oscila entre los 800 mV y 200 mV, el cual se puede atenuar utilizando un filtro pasa bajas, obteniendo niveles de voltaje del ruido por debajo de los 40 mV.
- Con la lente cilíndrica la señal presenta niveles de voltaje entre 400 mV a 20 mV, por lo que se requirió una etapa de amplificación con filtro pasa bajas, así que fue diseñado un circuito amplificador para una ganancia de 9.8, logrando un rango de voltaje entre 180 mV a 3.8 V con ruido de 10 mV.

Objetivo particular 4

Determinar el rango máximo de operación del sensor.

Considerando un brazo de 11 cm de longitud se obtiene los siguientes resultados:

- Con el uso de una superficie plana, una lente esférica y una fibra óptica receptora se llega obtener un ángulo de 6.12° en un rango en vertical de 1.3 cm con variaciones de 0.298 V por cada 0.254 mm.
- Con el uso de una superficie plana, una lente cilíndrica y una fibra óptica receptora se llega obtener un ángulo de 35.04° con un rango de 8.06 cm con variaciones de 0.0376 V por cada 0.254 mm.
- Con el uso de una superficie cóncava, una lente esférica y una fibra óptica receptora se llega obtener un ángulo de 4° con un rango de 0.78 cm con variaciones de 0.103 V por cada 0.254 mm.
- Con el uso de una superficie cóncava, una lente cilíndrica y una fibra óptica receptora se llega obtener un ángulo de 15° con un rango de 3.27 cm con variaciones de 0.0337 V por cada 0.254 mm.
- Con el uso de una superficie plana, una lente esférica y dos fibras ópticas receptoras se llega obtener un ángulo de 12.7° con un rango de 2.47 cm en vertical con variaciones de 0.199 V por cada 0.254 mm.
- Con el uso de una superficie plana, una lente cilíndrica y dos fibras ópticas receptoras se llega obtener un ángulo de 17.4° con un rango de 3.44 cm en vertical con variaciones de 0.0581 V por cada 0.254 mm.
- Con el uso de una superficie cóncava, una lente esférica y dos fibras ópticas receptoras se llega obtener un ángulo de 30.2° con un rango de 6.4 cm en vertical con variaciones de 0.0204 V por cada 0.254 mm.
- Con el uso de una superficie cóncava, una lente cilíndrica y dos fibras ópticas receptoras se obtiene un ángulo de 20.2° con un rango de 4.04 cm en vertical con variaciones de 0.0569 V por cada 0.254 mm.
- En las pruebas finales, se tomó el de la superficie plana, lente cilíndrica y una fibra óptica receptora, así que la resolución que se obtuvo en un ángulo de 15.65° hasta 21.07° , corresponde para la tarjeta Arduino UNO de 0.1353 mm/mV, mientras para la tarjeta de NI USB 6003 de 0.08779 mm/mV.

6.1 Recomendaciones

En el caso de llevar este sensor de nivel óptico en ambientes reales de medición, es necesario ajustar la longitud del vástago del flotador respecto al depósito donde se desea realizar las mediciones pertinentes.

Cabe mencionar que las monturas mecánicas del sistema de emisión y recepción de la señal, son elementos de un laboratorio óptico, así que, si se desea ajustar estos elementos, sería recomendable diseñar monturas acorde al diodo láser, fibras ópticas y fotodetector. También sería necesario utilizar una lente que confine la mayor cantidad de luz del diodo laser hacia la entrada de la fibra óptica emisora.

Para finalizar, la consideración de la tarjeta de adquisición de datos, va de acuerdo a la necesidad del usuario (mejor resolución o parte económica) pues las tarjetas Arduino son más económicas en comparación de una tarjeta de NI, pero una tarjeta Arduino ofrece una menor resolución, en comparación con la tarjeta de NI que brinda resoluciones más altas.

Referencias

1. Creus Antonio. *Instrumentación industrial*. Editorial Alfaomega. 8ª ed. México septiembre 2010.
2. OMEGA. Introducción a la medición de nivel. <http://mx.omega.com/prodinfo/medicion-de-nivel.html> (Mayo 2017).
3. Codisin *Control & Automatizacion*. Electrónica para el control integral de procesos <http://www.codisin.com/productos/instrumentacion/nivel.html> (Diciembre 2017).
4. G.Y.Y. Yhosep, A.H. Zaidan, Herlik Wibowo. *Gasoline level sensor based on displacement sensor using fiber coupler*. December 2014, Pages 342–348.
5. Syed Azer Reza, Nabeel A. Riza. *Optics Communications. Agile lensing-based non-contact liquid level optical sensor for extreme environments*. Volume 283, Issue 18, 15 September 2010, Pages 3391–3397.
6. Kyung-Rak Sohn. *Liquid-level monitoring sensor systems using fiber Bragg grating embedded in cantilever*. Volume 152, Issue 2, 18 June 2009, Pages 248–251.
7. Yu Zhao, Yongxing Jin, Jianfeng Wang, Xinyong Dong . *Detection of liquid-level variation using a SMS fiber structure*. 13 November 2012.
8. Mauro Lomer, Zubia Joseba, López-Higuera J.M. *Sensor de nivel de líquido multipunto basado en pérdidas de curvatura basadas en POF*. 3 October 2016.
9. Rak Sohn Kyung. *Liquid sensor using refractive intensity at the end-face of a glass fiber connected to fiber-Bragg grating*. Department of Electronics and Communicattions Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, South Korea. 4 January 2010.
10. Kumar Mahanta Deba, Laskar Shakuntala. *Oil-level measurement in power transformer using optical sensor*. India 2015.

11. Zhang Weihua, Ying Zesheng, Yuan Shuo, Tong Zhengrong. *A fiber laser sensor for liquid level and temperature base on two taper structures and fiber Bragg grating*. China 30 December 2014.
12. E. Musayev, S.E. Karlik. *A novel liquid level detection method and its implementation*. *Sensors And Actuators A*. 109 (2003) 21-24.
13. H. Gong, Haifeng Song, Sulei Zhang, et al. *An optical liquid level sensor based on polarization-mainting fiber modal interferometer*. *Sensors and Actuators A* 205 (2014) 204-207.
14. Yanli Ran, Li Xia, Dikai Niu, et al. *Design and demonstration of a liquid level fiber sensor based on selg-imaging effect*. *Sensors and Actuators A* 237 (2016) 41-46.
15. Hossen Golnabi. *Design and operation of a fiber optic sensor for liquid level detection*. *Optics and Lasers in Engineering* 41 (2004) 801-812.
16. H. Golbani, M. Bahar, M. Razani, et al. *Design and operation of an evanescent optical fiber sensor*. *Optics and Laser in Engineering* 45 (2007) 12-18.
17. Chengning Yang, Shiping Chen, Guoguang Yang. *Fiber optical liquid level sensor under cryogenic enrionment*. *Sensors and Actuators A* 94 (2001) 69-75.
18. H. Golnabi, P. Azimi. *Design and performance of a plastic optical fiber leakage sensor*. *Optics & Laser Technology* 39. (2007) 1346-1350.
19. F. Pérez-Ocón, M. Rubiño, J.M. Abril, et al. *Fiber optic liquid–level continuos gauge*. *Sensors and Actuatos A* 125 (2006) 124-132.
20. Pekka Raatikainen, Ivan Kassamakov, Roumen Kakanakov, et al. *Fiber-optic liquid-level sensor*. *Sensors and Actuators A* 58 (1997) 93-97.
21. Paulo Antunes, Joao Dias, Tiago Paixao, et al. *Liquid level gauge based in plastic optical fiber*. *Measurement* 66 (2015) 238-243.
22. Malacara Daniel. *Óptica básica*. 3ª ed. Ediciones Científicas Universitarias. México 2015.

23. Jenkins Francis A., White Harvey E. *Fundamentos de óptica*. 3a ed. Ediciones Aguilar. España.
24. Varnia.es *Conceptos Básicos sobre Ondas*. Consulta (12 Diciembre 2017) <http://varinia.es/blog/2010/12/07/conceptos-basicos-sobre-ondas/>
25. Douglas Giancoli. *Física 2 Principios con aplicaciones*. 6a ed. Editorial Pearson Educación. México, 2009.
26. Paul E. Tippens. *Física, conceptos y aplicaciones*. 7a ed. Editorial Mc Graw Hill. México 2011.
27. Hecht Eugene, *Óptica*. 3ra. ed. Addison Wesley Iberoamericana. Madrid, 2000.
28. Serway Raymond A. Faughn Jerry S. *Física*. 5ta edición. Pearson Educación, México, 2001. p.p. 770.
29. Douglas Giancoli. *Física para Ciencias e Ingeniería con Física moderna Vol. 2*. 4a ed. Editorial Pearson Educación. México, 2009.
30. Alonso Caviedes, José A. Collado Hornillos, Antonio Gómez Dacasa. *Oftalmología II*. Universidad de Cantabria. Servicio de Publicaciones, 1991.
31. Furlan Walter, García Monreal Javier, Muñoz Escrivá Laura. *Fundamentos de optometría*. 2a ed. Universitat de Valencia. 2011.
32. Ferrera Bello Carlos Andrés. *Implementación de un láser de fibra óptica sintonizable en función de la curvatura de una rejilla de periodo largo*. Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería. Abril 2012.
33. David Halliday, Robert Resnick. *Física Vol. 2*, p.p. 297-310.
34. Baltasar Rubio Martínez. *Introducción a la ingeniería de la fibra óptica*. RA-MA Editorial y publicaciones. 1994. p.p. 33-56.
35. Mohammad Azadeh. *Fiber Optics Engineering*. Springer Science & Business Media. 2009.
36. Sotelo Ortiz Jaime Heisen. *Las Fibras Ópticas de Plástico*. Electrónica-UNMSM (Universidad Nacional Mayor de San Marcos), Lima Perú. N° 22. Diciembre 2008.

37. Senior John M. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. 3rd ed. Prentice Hall, 2009.
38. Zetina Ángel, *Electrónica Básica*; Limusa 2004. Cap. 3.
39. Visible diode laser. *Red Laser Diodes*. Consulta: 12 Diciembre 2017
<http://visiblediodelasers.com/product/635nm-660nm-red-laser-diodes/?v=0b98720dcb2c>
40. Thorlabs. *Collimation tutorial*. Consulta: 12 Diciembre 2017
<https://www.thorlabs.com/tutorials.cfm?tabID=f7ed0dd5-3f31-4f84-9843-e0f7ac33f413>
41. Orazio Svelto, David C. Hanna. *Principles of Lasers, translated from Italian and edited by David C. Hanna*. 4th ed.
42. María Carmen España Boquera. *Comunicaciones Ópticas*. Ediciones Díaz de Santos. Madrid 2005.
43. Wayne Tomasi. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Pearson Educación, México 2003.
44. Douglas Giancoli. *Física 2 Principios con aplicaciones*. Editorial Pearson Educación. 6a Ed. México, 2009.
45. R Hoss. *Fiber Optic Communications*. Prentice Hall, 1990.
46. All Systems Broadband. TOSLINK cable.
<http://www.toshiba.com/taec/components/ProdLineGuide/toslink.pdf>
Consulta 8-Abril-2017.
47. Guide to fiber optics & premises cabling.
<http://www.thefoa.org/ESP/Sistemas.htm> Consulta 28-Agosto-2017
48. KY-008 Arduino Laser Module. Consulta 8-Abril-2017.
<http://www.electronicaestudio.com/docs/SHT-126.pdf>
49. Texas Instruments <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt101.pdf> Consulta 16-Abril-2017.
50. AG Electrónica <http://www.agspecinfo.com/pdfs/B/BLENT4.PDF> Consulta 9- Mayo-2017.