



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

**ELABORACIÓN DE UN SENSOR DE PRESIÓN DE  
FIBRA ÓPTICA MEDIANTE LA TÉCNICA DE  
INTERFERENCIA MULTIMODAL (MMI)**

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

**PRESENTA:**

**M.I.C.A. ALLAN RAINIER MEJÍA ARANDA**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO  
CO-DIRECTOR DE TESIS: DR. HÉCTOR HUGO CERECEDO NÚÑEZ**

**SINODALES:**

**DR. GUSTAVO URQUIZA BELTRÁN  
DR. DARWIN MAYORGA CRUZ  
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN  
DR. JOSE ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ  
DRA. LAURA LILIA CASTRO GÓMEZ**

**CUERNAVACA, MORELOS**

**JUNIO, 2018**

# RESUMEN

---

Actualmente existen una gran variedad de sensores utilizados para medir cualquier variable física que se desee, algunos pueden llegar a ser costosos debido al tipo de materiales y forma de construcción. La mayoría de estos sensores se ven limitados a utilizarse ambientes de alto riesgo debido a una de sus principales características, que es el uso de la electricidad para su funcionamiento.

La presente investigación busca proponer una alternativa óptica, en especial, a la medición de presión cambiando el uso de electricidad por el de la luz.

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, se utilizó una fibra óptica SMS colocada dentro de una membrana de silicón que funciona como diafragma y a su vez como protección de la fibra; la membrana es colocada en la parte superior de un colector que actúa como diafragma que al aplicar presión se deforma y esta a su vez provoca una deflexión en la membrana la cual generará cambios en valores de voltaje debido al uso de la técnica de Interferencia Multi – Modal (MMI). Se utilizó el software LabView para establecer una ecuación de relación entre el voltaje transmitido y la presión ejercida en el sensor. El cuerpo del colector está fabricado de acero inoxidable AISI 316.

Las mediciones de presión fueron comparadas en una balanza de peso muerto para conocer el porcentaje de error entre el sensor propuesto y uno comercial, posteriormente se probaron ambos en un dispositivo de golpe de ariete arrojando un error promedio de 17.02 % a comparación de un 7.3 % que presenta el sensor comercial. En cuanto a las pruebas en el golpe de ariete se observa el mismo comportamiento para ambos sensores.

# ABSTRACT

---

Nowadays exist a wide variety of systems to measure any physic variable, some of them can be very expensive because special construction features required. Systems mean characteristic are that works with electricity, so they are non-used on risk environments.

Therefore, present research is focused on optics measurement pressure systems, changing then electricity by light.

In this work were used a SMS optic fiber inside a silicon membrane as diaphragm and protect it. The membrane is placed on the surface, where, deflection by pressure will generate changes on the voltage transmitted through fiber due Muti-Modal Interference (MMI), LabView were used to establish the ratio between voltage and pressure on the sensor. For delayer stainless steel AISI 316 were selected.

Pressure measurements were compared on deadweight tester and water hammer, average error between both devices was of 17.02% against 7.3%, the operation both sensors are similar.

# AGRADECIMIENTOS

---

*Dedico este trabajo de tesis a mis padres **Juan Isidro y Tulia**, parte fundamental en mi vida, por brindarme todo su cariño y confianza, por ser mi sustento incondicional en cada una de las decisiones que he tomado y por todo su amor...gracias.*

*A mis hermanas **Erika y Karina**, que siempre han estado en todo momento cuando he necesitado de su apoyo y consejo... las amo.*

*A **Dios**, por haberme permitido alcanzar una meta tan importante en mi vida.*

# DEDICATORIAS

---

Agradezco a **Dios**, por permitirme llegar a este día.

A **mi familia**, por todo el amor, apoyo y comprensión incondicional que siempre me brindan.

A **CONACyT** por haber financiado este proyecto.

Al **Centro de Investigaciones en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp)**, por poner a disposición de este proyecto sus instalaciones y equipos.

Al **Dr. Miguel Ángel Basurto Pensado** y al **Dr. Héctor Hugo Cerecedo Núñez** por su tiempo, aporte de ideas y conocimientos.

A mi Jurado Revisor, gracias por su tiempo invertido y valiosas observaciones para el desarrollo de este trabajo.

- **Dr. Gustavo Urquiza Beltrán**
- **Dr. Darwin Mayorga Cruz**
- **Dr. Juan Carlos García Castrejón**
- **Dr. José Alfredo Rodríguez Ramírez**
- **Dra. Laura Lilia Castro Gómez**
- **Dr. Miguel Ángel Basurto Pensado**
- **Dr. Héctor Hugo Cerecedo Núñez**

# INDICE

---

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	iii
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.3 JUSTIFICACION.....	5
1.4 HIPÓTESIS.....	5
1.5 OBJETIVOS.....	5
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	5
CAPÍTULO 2	
MARCO TEÓRICO .....	7
2. SISTEMAS DE MEDIDA.....	7
2.1 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE MEDICION .....	8
2.2 TRANSDUCTORES Y SENSORES .....	8
2.2.1 TIPOS DE SENSORES Y TRANSDUCTORES.....	9
2.3 PRESION.....	11
2.4 SENSORES DE PRESION .....	14
2.4.1 DIAFRAGMAS .....	15
2.4.2 CAPACITIVOS.....	16
2.4.3 FIBRA OPTICA.....	16
2.4.3.1 CLASIFICACION DE SENSORES DE FIBRA OPTICA .....	18
2.4.4 FUELLES.....	22
2.4.5 TUBO BOURDON .....	22
2.4.6 MANOMETROS.....	25
2.5 GOLPE DE ARIETE.....	26
2.6 LUZ .....	28

2.6.1 REFLEXION Y REFRACCION .....	29
2.7 FIBRA OPTICA .....	33
2.7.1 CLASIFICACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA .....	34
2.7.2 INTERFERENCIA MULTIMODAL (MMI) .....	35
CAPITULO 3	
METODOLOGÍA Y ARREGLOS EXPERIMENTALES.....	40
3.1 FABRICACIÓN DE FIBRAS SMS (monomodo – multimodo – monomodo) .....	40
3.2 FABRICACION DE MOLDES PARA MEMBRANA .....	51
3.3 ELABORACION DE MEMBRANAS .....	55
3.4 FABRICACION DEL CUERPO DEL SENSOR .....	72
3.5 ARREGLOS EXPERIMENTALES PARA LA MEDICION DE INTENSIDAD DE LA FIBRA CON EL MOLDE PROPUESTO .....	78
3.5.1 VALORES DE INTENSIDAD (CUENTAS).....	78
3.5.2 VALORES DE POTENCIA .....	79
3.5.3 VALORES DE POTENCIA EN MOLDE INOX (0 – 3 MPa) .....	80
3.5.4 ADQUISICIÓN DE DATOS (VALORES DE VOLTAJE).....	85
3.6 GOLPE DE ARIETE.....	90
3.7 CALIBRACION DEL SENSOR ÓPTICO .....	95
3.8 PRUEBAS DE COMPARACION EN BALANZA DE PESO MUERTO ....	97
CAPÍTULO 4	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	100
4.1 FABRICACIÓN DE MEMBRANAS .....	100
4.2 APLICACIÓN DE PESO A LAS MEMBRANAS .....	101
4.3 GEOMETRIAS PROPUESTAS PARA EL DISEÑO DEL CUERPO DEL SENSOR .....	107
4.4 MEDICION DE LA INTENSIDAD DE LAS FIBRAS DENTRO DE LAS MEMBRANAS (0 – 25 psi) .....	123
4.5 MEDICION DE LA POTENCIA EN LAS FIBRAS DENTRO DE LAS MEMBRANAS FABRICADAS AL 5%, 10%, 15% Y 20% DENTRO DEL RANGO DE 0 A 25 PSI.....	127
4.6 PRUEBAS CON MOLDE INOX A 3 MPa.....	157
4.7 VALORES DE VOLTAJE .....	164

4.8 PRUEBAS EN EL GOLPE DE ARIETE .....	167
4.9 CALIBRACION DEL SENSOR OPTICO .....	175
4.9.1 PRUEBAS DE COMPARACION EN LA BALANZA DE PESO MUERTO .....	178
4.10 PRUEBAS FINALES EN EL GOLPE DE ARIETE .....	184
CAPITULO 5	
CONCLUSIONES FINALES Y RECOMENDACIONES .....	199
5.1 CONCLUSIONES .....	199
5.2 TRABAJOS FUTUROS.....	202
REFERENCIAS .....	203
APÉNDICE	
DESCRIPCIÓN DE EQUIPO EXPERIMENTAL.....	210

# LISTA DE TABLAS

---

<b>Tabla 2.1</b> Características de los tipos de sensores.....	10
<b>Tabla 2.2</b> Unidades de presión y equivalencias.....	14
<b>Tabla 2.3</b> Índice de refracción de diferentes medios.....	31
<b>Tabla 3.1</b> Valores de intensidad de las fibras.....	49
<b>Tabla 3.2</b> Valores de intensidad de las fibras SMS.....	51
<b>Tabla 3.3</b> Características de las membranas a fabricar.....	59
<b>Tabla 3.4</b> Características de las membranas.....	65
<b>Tabla 3.5</b> Segundo lote de membranas de PDMS.....	68
<b>Tabla 4.1</b> Membranas fabricadas.....	100
<b>Tabla 4.2</b> Segundo lote de membranas de PDMS.....	123
<b>Tabla 4.3</b> Resultado de los valores obtenidos utilizando la fuente de luz y el diodo láser.....	156
<b>Tabla 4.4</b> Valores de voltaje para el sensor óptico obtenidos en la calibración (0 a 1000 kPa).....	176
<b>Tabla 4.5</b> Resultados de la comparación de los sensores utilizando la balanza de peso muerto.....	183
<b>Tabla 4.6</b> Resultado promedio del error de los sensores.....	184
<b>Tabla 4.7</b> Comportamiento de las fibras.....	197

# LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 2.1</b> Elementos de un sistema de medición.....	8
<b>Figura 2.2</b> La presión (esfuerzo normal) es mucho mayor cuando el peso es el mismo pero el área donde se apoya en el suelo disminuye....	12
<b>Figura 2.3</b> Medición de la presión diferencial en un fluido.....	13
<b>Figura 2.4</b> Desplazamiento del diafragma, varía de acuerdo a la presión a medir.....	16
<b>Figura 2.5</b> Arreglo de un sensor de fibra óptica utilizando un fotodetector...	17
<b>Figura 2.6</b> Fibra óptica para detección de remolinos.....	18
<b>Figura 2.7</b> Clasificación de los sensores de fibra óptica.....	19
<b>Figura 2.8</b> Diagrama de un sensor de fibra óptica basado en modulación de amplitud o intensidad.....	20
<b>Figura 2.9</b> Sensor de fibra óptica tipo célula de flujo.....	21
<b>Figura 2.10</b> Elementos comunes en todos los sensores de fibra óptica.....	21
<b>Figura 2.11</b> Fuelle.....	22
<b>Figura 2.12</b> Tipos de tubo Bourbon.....	24
<b>Figura 2.13</b> Manómetro en U.....	25
<b>Figura 2.14</b> Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula.....	27
<b>Figura 2.15</b> Espectro de las ondas electromagnéticas.....	28
<b>Figura 2.16</b> Representación esquemática de la longitud de onda.....	29
<b>Figura 2.17</b> Fenómenos de reflexión y refracción en un haz de luz incidiendo en la interface entre dos medios transparentes.....	30
<b>Figura 2.18</b> Fenómenos de reflexión y refracción de la luz.....	33
<b>Figura 2.19</b> Estructura típica de una fibra óptica.....	33
<b>Figura 2.20</b> Arreglo típico de una estructura SMS.....	36
<b>Figura 2.21</b> Diagrama esquemático de una guía de onda MMF empalmada entre dos secciones de guía SMF.....	36
<b>Figura 2.22</b> Distribución del campo dentro de la sección MMF mostrando la generación de auto-imágenes.....	37

<b>Figura 2.23</b> Fibra diseñada para la primera imagen.....	39
<b>Figura 2.24</b> Perfil de una fibra MMI diseñada a la primera imagen y un diodo láser emitiendo a 1555 nm.....	39
<b>Figura 3.1</b> Marcas de la altura total y de referencia para la fibra.....	52
<b>Figura 3.2</b> Cortes transversales al molde.....	52
<b>Figura 3.3</b> Diagrama de las partes que conforman el molde.....	53
<b>Figura 3.4.</b> Moldes terminados con imanes colocados a ambos lados de la fibra SMS.....	53
<b>Figura 3.5.</b> Se agrega silicón en las ranuras.....	54
<b>Figura 3.6.</b> Molde sellado.....	54
<b>Figura 3.7.</b> Arreglo para el vaciado de PDMS en forma vertical.....	55
<b>Figura 3.8.</b> PDMS, catalizador y balanza.....	56
<b>Figura 3.9.</b> Mezcla colocada en el agitador de vórtice.....	56
<b>Figura 3.10.</b> Baño ultrasónico.....	57
<b>Figura 3.11.</b> a) Mezcla iniciando el proceso de agitación, b) mezcla con burbujas de aire.....	57
<b>Figura 3.12.</b> a) Con ayuda de la jeringa se vacía la mezcla en el molde, b) Membranas vaciadas.....	58
<b>Figura 3.13.</b> Molde vacío.....	59
<b>Figura 3.14.</b> Membrana lista.....	59
<b>Figura 3.15</b> Membrana al 5% de catalizador.....	62
<b>Figura 3.16</b> Membrana al 20% de catalizador.....	62
<b>Figura 3.17</b> Membrana al 15% de catalizador.....	62
<b>Figura 3.18</b> Fibra F9, presenta burbuja de aire que deforma la fibra SMS.....	63
<b>Figura 3.19</b> Fibra F10 deformada por curvatura.....	63
<b>Figura 3.20</b> Fibra astillada.....	63
<b>Figura 3.21</b> Fibra SMS fracturada.....	63
<b>Figura 3.22</b> Fibra flexionada dentro de la membrana.....	64
<b>Figura 3.23</b> Fibra fracturada.....	64
<b>Figura 3.24</b> Arreglo propuesto para la medición de presión.....	72

<b>Figura 3.25</b> a) Vista del molde completo, b) Sección transversal.....	74
<b>Figura 3.26</b> a) Vista del molde completo, b) Sección transversal.....	75
<b>Figura 3.27</b> a) Vista del molde completo, b) Sección transversal.....	76
<b>Figura 3.28</b> Diseño del molde (cuerpo del sensor).....	77
<b>Figura 3.29</b> Diseño de la tapa del molde (diafragma).....	77
<b>Figura 3.30</b> Arreglo montado en el laboratorio.....	79
<b>Figura 3.31</b> Arreglo montado en el laboratorio.....	80
<b>Figura 3.32</b> a) Cuerpo del molde, se agrega un canal en el borde superior para colocar un empaque, b) Dibujo de la tapa del molde.....	81
<b>Figura 3.33</b> Molde de acero inoxidable (INOX).....	82
<b>Figura 3.34</b> Prueba de fugas.....	83
<b>Figura 3.35</b> Arreglo experimental montado en el laboratorio.....	84
<b>Figura 3.36</b> Circuito amplificador.....	86
<b>Figura 3.37</b> Tarjeta para la adquisición de datos.....	87
<b>Figura 3.38</b> Diagrama de bloques del programa de adquisición de voltaje en función de la presión.....	88
<b>Figura 3.39</b> Panel frontal del programa de obtención del voltaje.....	88
<b>Figura 3.40</b> Arreglo experimental armado en el laboratorio.....	90
<b>Figura 3.41</b> a) Elementos del arreglo antes de instalarse en el golpe de ariete, b) Arreglo instalado en el golpe de ariete con los dos sensores conectados a la toma.....	92
<b>Figura 3.42</b> Diagrama de bloques del programa para almacenar y mostrar los valores de voltaje y presión.....	93
<b>Figura 3.43</b> Panel frontal del programa de adquisición de datos.....	94
<b>Figura 3.44</b> Molde soldado presenta fugas.....	95
<b>Figura 3.45</b> Arreglo para la calibración del sensor óptico.....	97
<b>Figura 3.46</b> Arreglo montado en el laboratorio utilizando la balanza de peso muerto.....	99
<b>Figura 4.1</b> Se puede apreciar la cruz formada por los bordes del molde. Cuando la “cruz” esta sobre la superficie será el lado B..	101

<b>Figura 4.2</b> a) Fibra por arriba de la mitad, b) Fibra por debajo de la mitad, c) Fibra con curvatura hacia arriba y, d) Fibra con curvatura hacia abajo.....	107
<b>Figura 4.3</b> Sección transversal del molde.....	108
<b>Figura 4.4</b> Contorno inicial de presión (vista desde la base).....	108
<b>Figura 4.5</b> Contorno de presión (transcurridos 5 seg).....	109
<b>Figura 4.6</b> Contorno final.....	109
<b>Figura 4.7</b> Sección transversal del molde.....	110
<b>Figura 4.8</b> Contorno inicial de presión.....	111
<b>Figura 4.9</b> Contorno final, vista desde la base.....	111
<b>Figura 4.10</b> Sección transversal del molde.....	113
<b>Figura 4.11</b> Contorno inicial de presión.....	113
<b>Figura 4.12</b> Contorno final, vista desde la base.....	113
<b>Figura 4.13</b> Sección transversal del molde.....	114
<b>Figura 4.14</b> Contorno inicial de presión.....	115
<b>Figura 4.15</b> Contorno final, vista desde la base.....	116
<b>Figura 4.16</b> Molde cónico sin escalón con entrada lateral de flujo y salida en la base, sección transversal.....	117
<b>Figura 4.17</b> Molde cónico sin escalón, salida lateral (inicio de la prueba).....	118
<b>Figura 4.18</b> Molde cónico sin escalón, salida lateral (término de la prueba).....	118
<b>Figura 4.19</b> Molde interior cilíndrico de baja altura con un solo orificio en la base, sección transversal.....	119
<b>Figura 4.20</b> Molde interior cilíndrico de baja altura con un solo orificio en la base (inicio de la prueba).....	119
<b>Figura 4.21</b> Molde interior cilíndrico de baja altura con un solo orificio en la base (término de la prueba).....	120
<b>Figura 4.22</b> Molde interior cilíndrico de baja altura y salida lateral, sección transversal.....	120

<b>Figura 4.23</b> Molde interior cilíndrico de baja altura y salida lateral (inicio de la prueba).....	121
<b>Figura 4.24</b> Molde interior cilíndrico de baja altura y salida lateral (término de la prueba).....	121
<b>Figura 4.25</b> Arreglo para la medición de intensidad de las fibras.....	124
<b>Figura 4.26</b> a) El cuerpo del sensor óptico es llenado de agua antes de comenzar las pruebas en el golpe de ariete, b) Una vez llenado, se conecta junto con el sensor comercial en el golpe de ariete.....	171
<b>Figura 4.27</b> Comportamiento por separado de los sensores.....	172
<b>Figura 4.28</b> Comportamiento de las señales.....	172
<b>Figura 4.29</b> Conexión de los sensores a la balanza de peso muerto.....	179
<b>Figura 4.30</b> Tapa del sensor deformada.....	189

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 ANTECEDENTES

La medición de variables tanto físicas como químicas es de gran interés en el área industrial, podemos encontrar un gran número de dispositivos que requieren para su funcionamiento de acciones mecánicas o señales eléctricas para realizar la medición. Se puede encontrar medidores de temperatura, fuerza, presión, nivel, humedad por mencionar algunos. Debido a sus características de diseño (material de fabricación, precisión en la medición, etc.) algunos de ellos llegan a ser costosos.

La presente investigación se centra en los dispositivos para la medición de presión que es una variable importante ya sea para el control, supervisión e incluso para el funcionamiento de otros dispositivos (calderas) en la industria. En el área de la investigación permite llegar al modelado de sistemas e interpretación de los mismos (túnel de viento, bombas, eficiencia en turbinas).

Dentro de los dispositivos para la medición de presión se pueden establecer cuatro grupos: resistivos, capacitivos, inductivos y por último los generadores [1]. Todos los sensores tienen ventajas y desventajas, pero el elemento en común en todos ellos es el uso de la electricidad.

El uso de la electricidad para el funcionamiento de los dispositivos hace que su uso sea limitado en algunos ambientes, haciendo que se busquen alternativas que reduzcan sus limitantes. Actualmente, la optoelectrónica y la tecnología de las fibras ópticas han alcanzado niveles de madurez técnica, de calidad y de costo están por mucho, alejados de aquellos actualmente disponibles [2].

Los sensores de fibra óptica representan una base tecnológica que puede ser aplicada a múltiples aplicaciones de sensado. Las siguientes son algunas ventajas de la fibra óptica que hace especialmente atractivo su uso para sensores [3,4].

- No es eléctrica.
- Mayor sensibilidad.
- Se emplean en ambientes hostiles (altas temperaturas, gases inflamables, ambientes corrosivos, ruido, radiaciones nucleares, alta tensión, etc.)
- No requiere contactos.
- Tamaño y peso pequeño.
- Gran versatilidad geométrica.
- Compatibilidad con sistemas de comunicación de datos
- Transmisión de datos segura.
- No emite radio frecuencia, ni se ve afectada por ella.
- Inmune a la interferencia electromagnética.
- Utilizable en forma remota.
- Permite el acceso dentro de áreas inaccesibles.
- Resistente a la radiación iónica.

Los sensores de presión que utilizan fibra óptica en lugar de electricidad son extensos debido a su versatilidad, los cuales se pueden clasificar en: sistemas interferométricos, rejillas de Bragg e interferencia multimodal; debido a que todos los sensores combinan los principios de las tres técnicas mencionadas.

Un gran número de sensores se basa en sistemas interferométricos, por lo general el más utilizado es el interferómetro Fabry – Perot el cual consiste en dos espejos reflectantes (espejo, diafragma o membrana) separados por una

cavidad de una longitud conocida. Se utilizan dos haces de luz, uno que recorre el camino hasta el espejo colocado en uno de sus extremos y que será reflejado al momento de aplicar presión en el espejo aumentando o disminuyendo la longitud de la cavidad aumenta, el haz reflejado se compara con el haz que sirve de referencia y por medio de interferometría constructiva o destructiva se analizan las distancias entre las franjas. Estos sistemas dependen mucho de la estabilidad ya que son extremadamente sensibles a las perturbaciones que alteran el camino que recorre la luz entre los dos espejos. Una de las ventajas de utilizar este interferómetro a comparación del Mach – Zender, Michelson o Sagnac es que no requiere de acopladores de la fibra que pueden complicar la interpretación de los datos. Se puede utilizar de tanto de forma intrínseca como extrínseca. Los rangos de operación de este tipo de sensores abarcan desde los 0.26 psi hasta por arriba de los 10,000 psi [5 – 39].

Otro tipo de dispositivos son los que utilizan rejillas de Bragg, el cual consiste en una fibra óptica con diversos puntos de reflexión hechos a base de incidir un patrón de interferencia que proviene de una fuente de luz ultravioleta sobre el núcleo de la fibra, la cual produce una rejilla de fase; todo este proceso se lleva a cabo por efecto de fotosensibilidad. Al hacer pasar luz por el núcleo una parte es reflejada y otra es transmitida. La luz que es reflejada es tratada para la interpretación de resultados. Este tipo de fibras son más estables que los sistemas interferométricos pero se ven afectadas por la temperatura y deformación las cuales tienden a disminuir agregando sistemas de compensación. Un factor importante es que dependen de equipos como el analizador de espectros óptico (OSA). Los rangos de operación que podemos encontrar para este tipo de sensores abarcan desde los 0.4 psi hasta los 14,000 psi [40 – 53].

En ocasiones, también se puede encontrar la combinación de dos o más técnicas de medición, como es el caso de los sensores que utilizan técnicas interferométricas y rejillas de Bragg para poder medir simultáneamente dos variables [54 – 56].

Por último y no menos importante, se encuentran los sensores que utilizan la técnica de interferencia multimodal (MMI). Técnica que consiste en colocar una sección de fibra multimodo entre una sección de fibra monomodo, la base de su funcionamiento es la autoimagen. La sección de fibra multimodo está diseñada para que la imagen que se forma al inicio de la sección se repita al final, mientras que a lo largo de esa sección las imágenes se repiten, aunque con menor intensidad. La variación de la señal dependerá del cambio del índice de refracción de la fibra, haciendo que la imagen se mueva al final de la sección multimodo [4, 57 – 62]. Una de las ventajas de esta técnica es que la señal de salida se puede medir con cualquier dispositivo diseñado para medir la intensidad del haz de luz. Los efectos de MMI en una fibra con estructura SMS fueron investigados y utilizados para el desarrollo de aplicaciones de sensado y de procesamiento de señales [63 – 66]. Estos dispositivos ópticos ofrecen una solución basada totalmente en fibra con las ventajas de fácil fabricación, empaquetado e interconexión con otros tipos de fibra óptica mediante sistemas de medición de intensidad de luz [67].

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En el área de los dispositivos para medir presión, la base del funcionamiento recae en un diafragma que sirve de transductor entre la presión aplicada y la manera de interpretarla; actualmente, el principio de funcionamiento continúa vigente, pero incorpora componentes electrónicos que son capaces de manejar información en tiempo real y poder enviarla a lugares determinados para poder monitorear esa información. Sin embargo, el uso de componentes electrónicos limita el uso de esos dispositivos en lugares donde el ambiente

de trabajo es nocivo para ellos, así como para las instalaciones e inclusive personas. El uso de electricidad para el funcionamiento de los dispositivos en ambientes hostiles: corrosión al metal, campos electromagnéticos, gases explosivos y humedad por mencionar algunos, hacen que su tiempo de vida sea corto, su uso limitado y que el costo sea elevado, aunque este último no asegura un correcto funcionamiento.

### **1.3 JUSTIFICACION**

Desarrollar un sistema alternativo a los comerciales existentes, para la medición de presión que pueda ser utilizado en cualquier condición de operación (ambientes normales y de riesgo), para ello se utilizará un sensor óptico con el cual, se brinda seguridad al trabajar en ambientes donde exista humedad o gases explosivos, ya que la luz presenta una gran ventaja en comparación a un sensor o dispositivo que utilice componentes electrónicos para su operación.

### **1.4 HIPÓTESIS**

Se pueden utilizar las propiedades de una fibra del tipo Monomodo – Multimodo – Monomodo (SMS) para la detección de presión, mediante el monitoreo de su señal.

### **1.5 OBJETIVOS**

#### **1.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un sensor para la medición de presión utilizando una fibra óptica diseñada bajo la metodología interferencial multi – modal (MMI).

#### **1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Caracterización de las fibras MMI.
- Caracterización de diferentes membranas.
- Análisis y diseño del encapsulado para el sistema.
- Establecer ecuaciones matemáticas para la calibración del sensor.
- Comparar el sensor con otros sensores comerciales.
- Realizar pruebas en el simulador de golpe de ariete.

La investigación que se presenta esta conformada por los siguientes capítulos: CAPITULO 1 el cual se refiere a la revisión bibliográfica, planteamiento del problema, justificación y objetivos. El CAPITULO 2 corresponde a la teoría que soporta esta investigación, en el CAPITULO 3 se presenta toda la metodología y arreglos experimentales utilizados durante la investigación, así como las herramientas y equipos utilizados. El CAPITULO 4 está conformado por todos los resultados obtenidos de los arreglos experimentales, así como su interpretación, por ultimo se mencionan las conclusiones a las que se llegó en el CAPITULO 5 como resultado de los arreglos y pruebas realizadas, también se mencionan algunas recomendaciones y se proponen trabajos a realizar en un futuro.

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO

---

### **2. SISTEMAS DE MEDIDA**

Se denomina sistema a la combinación de dos o más elementos, subconjuntos y partes necesarias para realizar una o varias funciones. En los sistemas de medida, esta función es la asignación objetiva y empírica de un número a una propiedad o cualidad de un objeto o evento, de tal forma que la describa. Es decir, el resultado de la medida debe ser: independiente del observador (objetiva), basada en la experimentación (empírica), y de tal forma que exista una correspondencia entre las relaciones numéricas y las relaciones entre las propiedades descritas [2].

Las técnicas de medición han sido de gran importancia desde el comienzo de la civilización, desde la adquisición de bienes, así como su intercambio. Las innovaciones tecnológicas (electrónicas y computacionales) han dado paso al desarrollo de nuevos instrumentos y técnicas de medición para satisfacer las necesidades tanto en la industria como en la vida cotidiana.

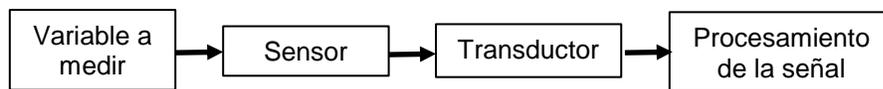
Actualmente, las aplicaciones de los sistemas de medición se pueden clasificar en tres áreas. La primera de ellas es su uso en aplicaciones comunes, utilizando instrumentos de medición de cantidades físicas como longitud, volumen y masa, en términos de unidades estándar. La segunda área de aplicación de instrumentos de medición es en el monitoreo de funciones, estos instrumentos permiten a una persona tomar acciones que correspondan; un termómetro en una casa para saber si abrir la ventana o encender la calefacción, un barómetro que indica el clima y saber si lloverá o no, en un proceso químico donde se indique la temperatura y presión en varios puntos,

los valores que se obtengan en el transcurso indicarán si se encienden ventiladores y se abren o cierran válvulas. La tercera y última área de aplicación son los sistemas de control automático, un ejemplo sencillo sería el control de temperatura de una habitación, si la temperatura aumenta se enciende un ventilador y si desciende se enciende la calefacción. Las características de los sistemas de control automático [68].

## 2.1 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE MEDICION

Un sistema de medición sirve para proveer información acerca del valor o estado de alguna variable física que se desee medir. En los casos simples consiste en un elemento que proporcione un valor de salida o acorde a la magnitud a medir.

En situaciones más complejas, el sistema (Figura 2.1) consiste en elementos separados que se encargan de realizar la medición. El primer elemento de un sistema de medición es el sensor que proporciona un valor de salida en función de lo medido, el siguiente elemento es el transductor que convierte la señal de salida en otra señal de salida de diferente forma, continúan los elementos de procesamiento de señal que se encargan de tomar la señal proveniente del transductor y convertirla en valores de medición que se puedan interpretar fácilmente.



**Figura 2.1** Elementos de un sistema de medición.

## 2.2 TRANSDUCTORES Y SENSORES

Un transductor es un dispositivo que convierte una señal proveniente de alguna forma física en otra señal diferente correspondiente. Existen seis tipos de señales: mecánicas, magnéticas, térmicas, ópticas, químicas y eléctricas;

un transductor es capaz de convertir una señal de un tipo a otro. Para su uso se considera como transductor aquel que es capaz de convertir una señal de entrada de cualquier tipo en una señal de salida eléctrica.

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas del medio donde se encuentre y proporcionar una señal de salida que sea capaz de manipularse para poder cuantificarla.

En ocasiones las palabras sensor y transductor se utilizan como sinónimos, pero sensor sugiere un significado más extenso; la ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos. Transductor, en cambio, sugiere que la señal de entrada (física o eléctrica) y la de salida (eléctrica o de presentación) no deben ser homogéneas. La tendencia actual es emplear el término sensor para designar el transductor de entrada y el término actuador o accionamiento para designar el transductor de salida. Los primeros pretenden la obtención de la información, mientras que los segundos buscan la conversión de energía [2].

### **2.2.1 TIPOS DE SENSORES Y TRANSDUCTORES**

Actualmente existen diversos tipos de sensores para medir cualquier magnitud física, cada uno de ellos tiene características de funcionamiento que lo hacen adecuado para una magnitud determinada. A continuación, se mencionan algunos tipos de que existen (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1** Características de los tipos de sensores.

Tipo de sensor	Características	Uso
Capacitivos	<p>Consiste en dos placas metálicas paralelas (una fija y otra móvil) en donde el dieléctrico entre ambas placas puede ser aire u otro material. Son usados comúnmente como sensores de desplazamiento, en donde el movimiento de la placa móvil provoca cambios en la capacitancia.</p>	<p>Desplazamiento, aceleración y presión.</p>
	<p>Una variante de este sensor es cuando las dos placas son fijas y el dieléctrico entre ellas cambia de alguna forma y con ello la capacitancia.</p>	<p>Contenido de mezcla, humedad, nivel de líquido.</p>
Resistivos	<p>Su principio de funcionamiento es el cambio de resistencia del material cuando la variable a medir se aplica en él.</p>	<p>Termómetro, termistor.</p>
Magnéticos	<p>Utilizan el fenómeno de la inductancia, reluctancia y corriente inducida para</p>	<p>Desplazamiento.</p>

	indicar la cantidad medida, la cual es usualmente por desplazamiento.	
Piezo-resistivos	El principio de funcionamiento es el cambio de resistencia del material semiconductor por acción de comprimirse o estirarse.	Deformación.
Ópticos	Están basados en la modulación de la luz entre una fuente de luz y un detector de luz. La luz transmitida puede viajar por un camino en el aire o a través de una fibra óptica.	Proximidad, movimiento lineal y rotacional, concentración de gas.
Fibra óptica	Transmiten luz por una fibra, midiendo los cambios de la característica de la luz transmitida por el cable. Existen sensores extrínsecos <sup>1</sup> e intrínsecos <sup>2</sup> .	Proximidad, desplazamiento, presión, pH, temperatura.

### 2.3 PRESION

La presión se define como la fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área. Se habla de presión solo cuando se trata de gas o líquido, mientras que la contraparte de la presión en sólidos es el esfuerzo normal. La presión se

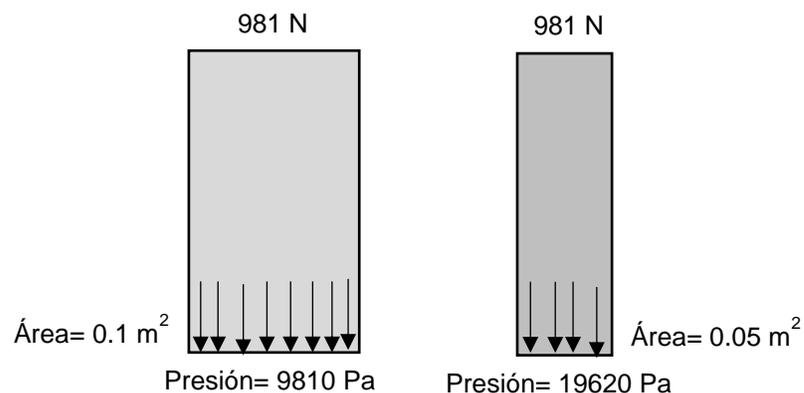
<sup>1</sup> El cable de la fibra óptica es usado solo para guiar la luz hacia un sensor.

<sup>2</sup> El cable de fibra óptica funciona como guía de luz y sensor al mismo tiempo.

define como fuerza por unidad de área, tiene como unidad el newton por metro cuadrado ( $\text{N/m}^2$ ), también conocida como pascal (Pa).

El pascal es una unidad muy pequeña por lo que los términos kilopascal (kPa) y megapascal (MPa) son los más utilizados. Otras unidades utilizadas principalmente en Europa son: bar ( $10^5$  Pa), atmosfera estándar ( $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ ) y kilogramo fuerza por centímetro cuadrado ( $1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa}$ ) [69].

La presión también se puede aplicar en sólidos, es llamada esfuerzo normal, en donde la fuerza actúa perpendicularmente sobre la superficie por unidad de área. Un ejemplo sería un objeto de 981 N (newton) colocado sobre el suelo en el que abarca una superficie de  $0.1 \text{ m}^2$ , la presión ejercida por el objeto en el suelo es de 9810 Pa (Figura 2.2). Si el objeto disminuye de área, pero el peso continúa siendo el mismo, la presión aumentará.



**Figura 2.2** La presión (esfuerzo normal) es mucho mayor cuando el peso es el mismo pero el área donde se apoya en el suelo disminuye.

La presión real en una determinada posición se llama **presión absoluta**, y se mide respecto al vacío absoluto. Sin embargo, la mayor parte de los dispositivos para medir la presión se calibran a cero en la atmosfera, por lo

que indican la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica local; esta diferencia es la **presión manométrica**. Las presiones por debajo de la atmosférica se conocen como **presiones de vacío** y se miden mediante medidores de vacío que indican la diferencia entre las presiones atmosférica y absoluta. Las presiones de vacío, manométrica y absoluta, son todas positivas y se relacionan entre sí.

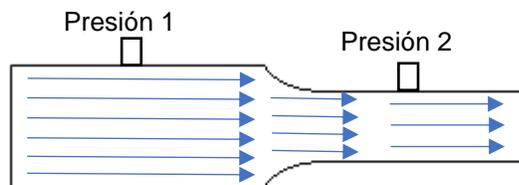
$$P_{absoluta} = P_{atmosférica} - P_{vacío} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$P_{manométrica} = P_{absoluta} - P_{atmosférica} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$P_{vacío} = P_{atmosférica} - P_{absoluta} \dots\dots\dots (2.3)$$

La presión es la fuerza de compresión por unidad de área y da la impresión de ser un vector. Sin embargo, la presión en cualquier punto de un fluido es la misma en todas direcciones, es decir, tiene magnitud, pero no dirección específica y por lo tanto es una unidad escalar.

Algunas ocasiones, interesa conocer el valor de la presión entre dos puntos de interés que el conocer el valor de la presión absoluta de un sistema, a este tipo de medición se le conoce como **presión diferencial** (Figura 2.3). La presión diferencial se obtiene de la diferencia de dos valores de presión absoluta de dos diferentes puntos establecidos dentro de una tubería por donde circula un mismo fluido. Por lo general la presión absoluta es la diferencia de la presión mayor menos la menor no importando cual sea el lugar del punto 1 y el punto 2 de donde se toman los valores.



**Figura 2.3** Medición de la presión diferencial en un fluido.

En la siguiente tabla (Tabla 2.2) se presentan las unidades más comunes de presión entre las que podemos encontrar **psi** (pounds per square inch), **mm de Hg** o **torr**, **atm** (atmosferas, corresponde a la presión atmosférica a 0 metros sobre el nivel del mar) por mencionar algunas.

**Tabla 2.2** Unidades de presión y equivalencias.

	<b>kPa</b>	<b>psi</b>	<b>Atm</b>	<b>mm Hg</b>	<b>cm H<sub>2</sub>O</b>	<b>bar</b>
<b>kPa</b>	1	0.14504	0.00998694	689.46	10.198	10 <sup>-3</sup>
<b>Psi</b>	6.8946	1	0.068046	51.714	70.310	0.068496
<b>Atm</b>	101.32	14.696	1	759.83	1033.33	1.0066
<b>mm Hg</b>	0.13332	0.019337	0.0013161	1	1.3596	0.0013148
<b>cm H<sub>2</sub>O</b>	0.098062	0.014223	0.00096780	0.73551	1	0.00097416
<b>bar</b>	10 <sup>3</sup>	14.504	0.99343	754.85	1026.5	1

La presión se refiere a la acción del fluido sobre las paredes del recipiente que lo contienen; cuando la presión es ejercida por un sólido se le llama tensión. La presión ejercida por un fluido puede ser **estática o dinámica**, la primera es producida por el fluido en reposo sobre las paredes del recipiente mientras que la segunda se produce sobre una superficie perpendicular en la dirección del movimiento de un fluido.

## 2.4 SENSORES DE PRESION

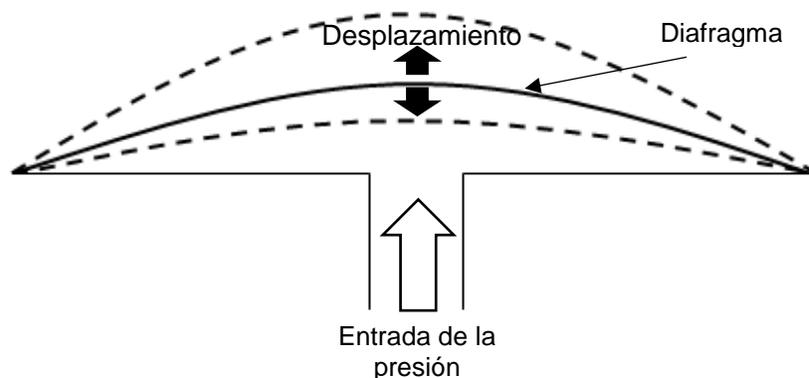
En muchas aplicaciones, los valores típicos de presión se encuentran dentro del rango desde 1.013 bar hasta los 7000 bar. Estos rangos, son considerados dentro de lo normal y diversos sensores de presión son viables para trabajar dentro de estos rangos, aunque pueden existir sensores que trabajen por debajo o muy por encima de estos rangos considerados normales, los cuales están diseñados para satisfacer los requerimientos de medición especiales.

Un punto interesante es el saber qué tipo de presión se va a medir, estática o dinámica; en especial, el área de la presión dinámica requiere de instrumentos especiales, versiones modificadas de sensores con diafragma que pueden ser utilizados si contienen un elemento de desplazamiento (cristal piezoeléctrico o elemento capacitivo). A continuación, se hace mención de algunos tipos de sensores de presión [68].

#### **2.4.1 DIAFRAGMAS**

Es uno de los tres tipos de elementos elásticos transductores de presión (Figura 2.4). La presión aplicada produce desplazamiento en el diafragma y su movimiento es medido por un transductor de desplazamiento. Dependiendo del tipo de diafragma (material y dimensiones) colocado en un sensor, éste puede llegar a medir presiones muy grandes; presiones absolutas hasta arriba de 50 bar y presiones manométricas por encima de los 2000 bar por mencionar un ejemplo. Los diafragmas también pueden ser utilizados para la medición de presión diferencial en rangos por arriba de los 2.5 bar en donde se aplican dos presiones en ambos lados del diafragma. El material con el que está construido el diafragma puede ser plástico, metal, acero inoxidable o material cerámico. Los diafragmas de plástico son baratos a comparación de uno de acero inoxidable, pero este último tiene una mejor exactitud. También presenta resistencia a ambientes corrosivos y a altas temperaturas. Los de material cerámico son resistentes a los ácidos y a medios alcalinos y son utilizados en ambientes hostiles.

Por lo general, el desplazamiento de un diafragma es de 0.1 mm, el cual puede ser medido con una galga extensiométrica que funciona como transductor, es normal utilizar circuitos de configuración de puente. La salida de voltaje del circuito de puente está en función del cambio de resistencia debido al movimiento del diafragma.



**Figura 2.4** Desplazamiento del diafragma, varía de acuerdo a la presión a medir.

### 2.4.2 CAPACITIVOS

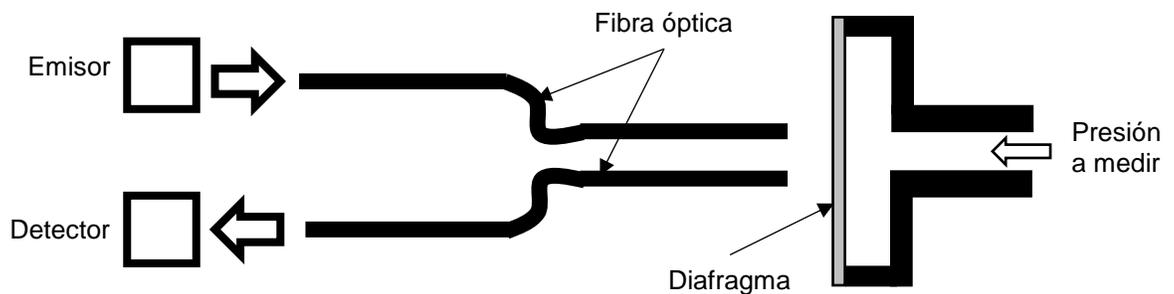
Un sensor de presión capacitivo no es más que un simple sensor del tipo diafragma, dispositivo en el cual el desplazamiento es determinado por la medición en el cambio de la capacitancia entre el diafragma y una placa metálica localizada cerca de él. Su uso es muy común, incluso, es posible fabricar elementos capacitivos en un chip de silicón y obtener un micro sensor. Este tipo de sensores presentan alrededor de  $\pm 0.2\%$  de error.

### 2.4.3 FIBRA OPTICA

Un método alternativo para medir desplazamientos en el diafragma es mediante el uso de optoelectrónica y tienen la característica de ser sensores de poco peso y tamaño comparados con los sensores de desplazamiento que utilizan otros métodos. Una forma de medir el desplazamiento del diafragma es por medio de un sensor óptico, en el cual, la luz proveniente de una fuente emisora viaja a través de una fibra óptica hasta reflejarse en el diafragma, entonces, la luz de nueva cuenta viaja por otra fibra óptica hasta llegar a un fotodetector (Figura 2.5). Para medir la presión, debe relacionarse la distancia

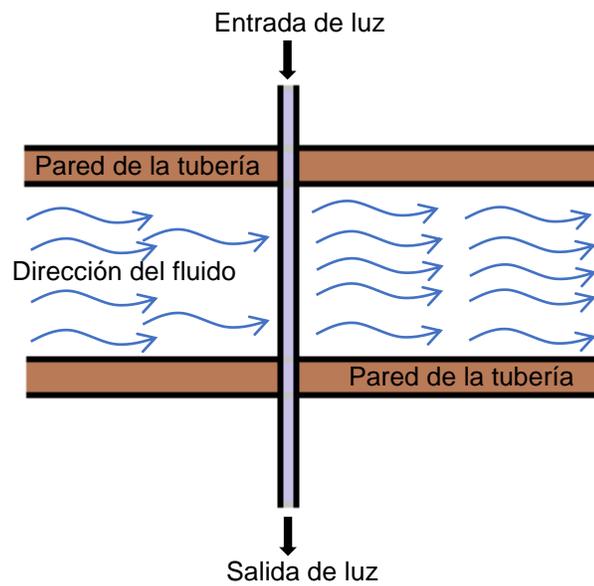
desde el final de la fibra hasta el diafragma, la cantidad de luz reflejada en el diafragma dependerá de que tanto se ha desplazado este último en función de la presión aplicada.

Considerando el tamaño y peso pequeño de los sensores de fibra óptica, otra ventaja es que la señal de salida es inmune a los campos electromagnéticos. A pesar de eso, los sensores de fibra óptica utilizando diafragmas para medir desplazamiento están limitados a aplicaciones en donde se aprovechen las ventajas antes mencionadas.



**Figura 2.5** Arreglo de un sensor de fibra óptica utilizando un fotodetector. La luz emitida rebota en el diafragma y viaja de regreso por una segunda fibra. La relación de la distancia de la primera fibra y el diafragma proporciona una salida en función de la presión.

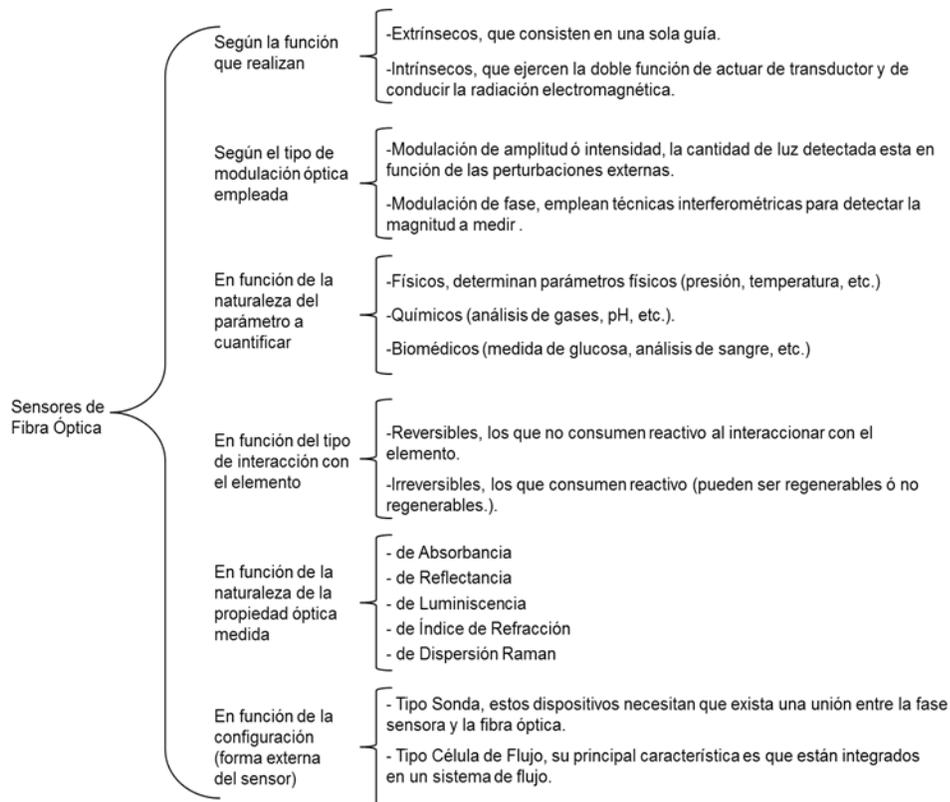
Con su limitado uso en diafragmas, la fibra óptica ofrece alternativas para medir presión, una de ellas es la del cambio del índice de refracción que varía de acuerdo a la presión aplicada para el caso de bajas presiones; también se pueden utilizar para la detección de remolinos dentro de tuberías por donde pasa el flujo, en este caso las fibras atraviesan la tubería (Figura 2.6).



**Figura 2.6** Fibra óptica para detección de remolinos.

#### **2.4.3.1 CLASIFICACION DE SENSORES DE FIBRA OPTICA**

La clasificación de los sensores de fibra óptica (Figura 2.7) puede hacerse atendiendo a diversos criterios [1,3,70].



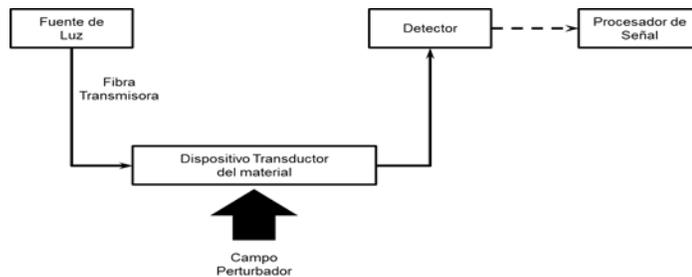
**Figura 2.7** Clasificación de los sensores de fibra óptica.

De acuerdo con la figura anterior, las características con las que debe contar el sensor son las siguientes:

**Sensor intrínseco:** en este tipo de sensor la fibra óptica ejerce la doble función de actuar de transductor y de conducir la radiación electromagnética. En los sensores intrínsecos algunas propiedades de las guías ópticas se modifican por la acción del medio ambiente (índice de refracción y características de absorción entre otras). Este tipo de sensores tienen una mayor aplicación en el área de los sensores físicos (por ejemplo, determinación de la temperatura o presión).

Sensor de fibra óptica basado en **modulación de amplitud o intensidad** (Figura 2.8). En este tipo de sensores la cantidad de luz detectada es función

de las perturbaciones externas. Emplean óptica y circuitos simples. Generalmente están asociados con desplazamiento o algunas perturbaciones físicas que interactúan con un transductor ligado a la fibra. Son los sensores de fibra óptica comerciales más extendidos.

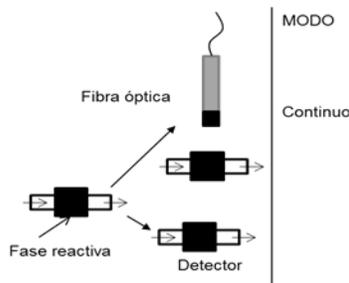


**Figura 2.8** Diagrama de un sensor de fibra óptica basado en modulación de amplitud o intensidad.

Sensor de fibra óptica **físico**: es aquel que determina parámetros físicos como medida de temperatura, presión, desplazamiento, flujo, rotación, etc.

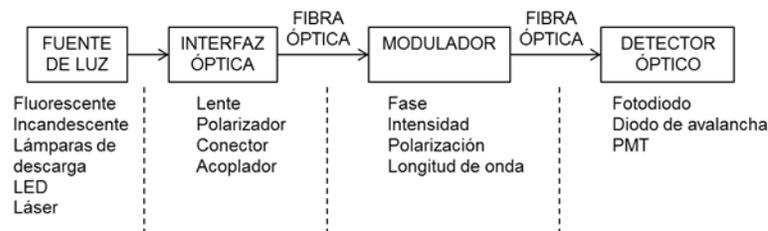
Sensor de fibra óptica **reversible**: es aquel que no consume reactivo al interaccionar con el elemento, por ejemplo, los sensores de pH.

Sensor de fibra óptica tipo **célula de flujo** (Figura 2.9): su principal característica es que está integrado en un sistema de flujo. La fase de sensado se dispone en el sistema de detección y por lo tanto los procesos de reacción sobre la fase reactiva y la detección son simultáneos, no hay unión entre la fase reactiva y la fibra óptica. Este tipo de sensores trabajan en continuo.



**Figura 2.9** Sensor de fibra óptica tipo célula de flujo.

La Figura 2.10 muestra un diagrama de bloques general de un sensor de fibra óptica. Generalmente todos los sistemas tienen una fuente de luz, una interfaz con la fibra óptica, un modulador que altera la luz de forma proporcional a la perturbación (magnitud física a medir) y un detector óptico que detecta y mide los cambios en la luz de la fibra, dando una señal eléctrica en su salida que es procesada electrónicamente.



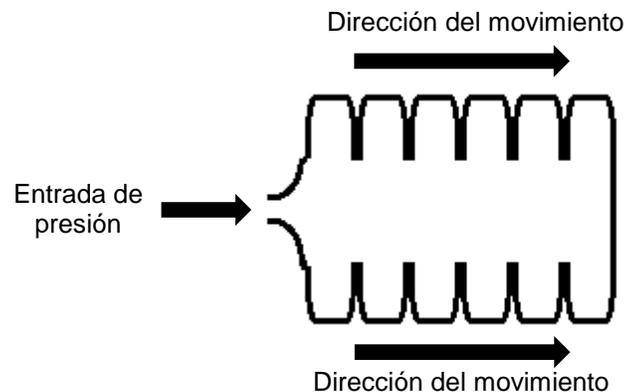
**Figura 2.10** Elementos comunes en todos los sensores de fibra óptica.

La magnitud física a medir altera los parámetros ópticos de la fibra: índice de refracción, coeficiente de absorción de la luz, dimensiones lineales. Esta alteración es debida a fenómenos físicos de diferente naturaleza: electro-óptico, magneto-óptico, piezo – eléctrico, acústico – óptico, piezo – óptico, etc. El bloque modulador convierte el cambio en el parámetro óptico de la fibra en un cambio en un parámetro de la señal óptica que se transmite por la fibra. Se puede tener un cambio en la amplitud, la fase, la rotación del plano de polarización o en la longitud de onda de la señal óptica. Hay que tener en

cuenta que un único parámetro físico puede originar diferentes tipos de medida pues puede dar lugar a distintos fenómenos físicos que modulan de diferentes formas los parámetros ópticos del medio.

#### 2.4.4 FUELLES

Son otro tipo de elementos elásticos que sirven para la medición de la presión, similares a los principios de operación de los diafragmas. Son fabricados como cámaras continuas (Figura 2.11), las cuales, al aplicar presión, producen desplazamiento longitudinal y al final del fuelle puede ser medido por un transductor capacitivo, inductivo o potenciométrico. El material con el que se fabrican puede ser de metal o alguna aleación metálica. Pueden medir presión absoluta por arriba de los 2.5 bar y manométricas por arriba de los 150 bar. Arreglos de doble fuelle pueden existir y están diseñados para medir presión diferencial por arriba de los 30 bar.



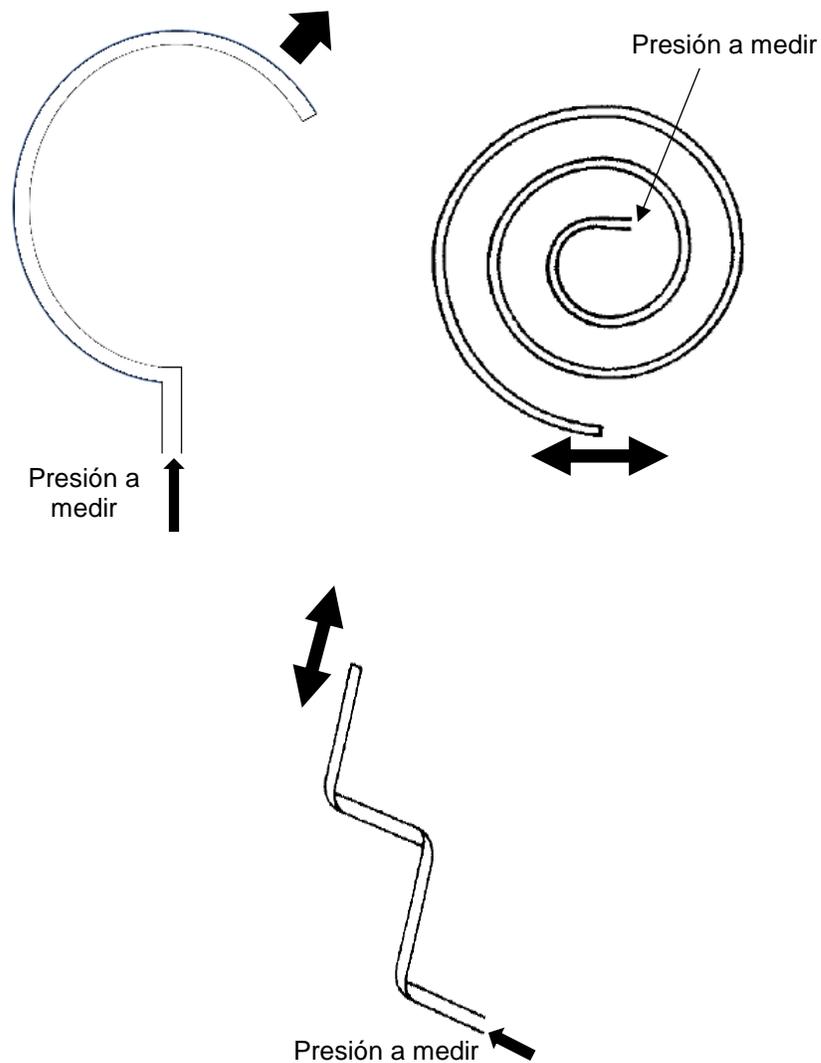
**Figura 2.11** Fuelle.

#### 2.4.5 TUBO BOURDON

Es un elemento elástico que funciona como transductor de presión. Es relativamente barato y es comúnmente utilizado para medir presión manométrica en gases y fluidos. Consiste en una pieza metálica de forma especial de sección ovalada y flexible, en donde uno de los extremos en

colocado en donde se requiere medir la presión y el otro extremo queda libre. Cuando la presión es aplicada en el extremo, la sección ovalada comienza a hacerse circular, haciendo que el extremo libre del tubo comience a desplazarse. El desplazamiento es medido por algún transductor potenciométrico o LVDT (transformador diferencial de variación lineal por sus siglas en ingles).

Las tres formas comunes del tubo de bourdon son: en curvado o tipo C, helicoidal y espiral (Figura 2.12). El tamaño, la forma y el material del tubo dependen del rango de operación. Por lo general, para rangos menores a los 2000 psi (138 bar) los tubos se fabrican de bronce, por arriba del rango de los 2000 psi se fabrican de acero inoxidable o de algún otro material de alta resistencia. Otra característica dependiendo del rango de operación es la sección transversal, los tubos de rangos menores su sección es oval mientras que en los de rangos altos la sección es circular.



a) Tipo C

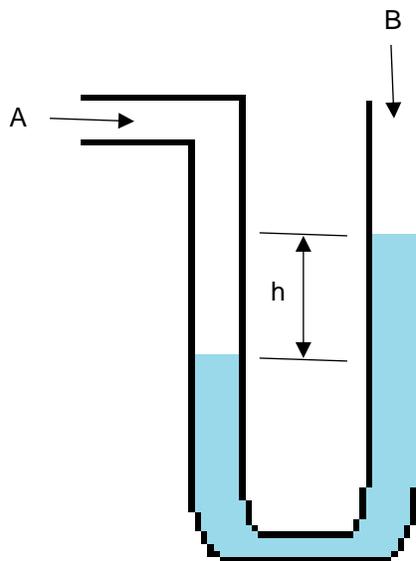
b) Tipo Espiral

c) Tipo Helicoidal

**Figura 2.12** Tipos de tubo Bourbon. El tubo en forma de C es el más utilizado, está sellado de un lado y abierto del otro. El tubo en espiral y helicoidal producen un mayor desplazamiento en el extremo libre, lo que proporciona una mayor sensibilidad, cuentan con una sección transversal es aplanada y son ideales para el registro de presión.

## 2.4.6 MANOMETROS

Son instrumentos pasivos que proporcionan una indicación visual del valor de la presión. El manómetro de tubo en U (Figura 2.13) es el más común. La presión aplicada causa un desplazamiento del líquido dentro de un tubo de vidrio en forma de U, la señal de salida para medir la presión se basa en observar la diferencia de alturas entre el nivel del líquido en dos posiciones en el tubo. Si una presión desconocida es aplicada en el punto A y el punto B se encuentra abierto a la atmosfera, la salida será una medición de presión manométrica. Los manómetros en U son utilizados para medir presión manométrica y diferencial cercana a los 2 bar.



**Figura 2.13** Manómetro en U.

Habiendo presentado un panorama de los sensores que existen y las áreas de aplicación, al seleccionar un sensor de presión adecuado se debe considerar lo siguiente:

- El medio de trabajo, se deben considerar las condiciones de trabajo y los materiales a los que estará expuesto. Si el sensor no es lo suficientemente resistente puede provocar fallas a corto plazo.
- Sobrepresiones, considerar que el sensor puede estar expuesto a cambios repentinos de presión las cuales no están dentro de su rango de operación; el sensor debe ser capaz de soportarlas y continuar trabajando sin ningún problema.
- Temperatura de trabajo, se debe considerar el material con el cual está fabricado el sensor y las temperaturas en las cuales estará operando.
- Lugar de instalación, en ocasiones los lugares donde se colocan son de difícil acceso, por ello se recomienda instalarlos en una derivación de la tubería principal.

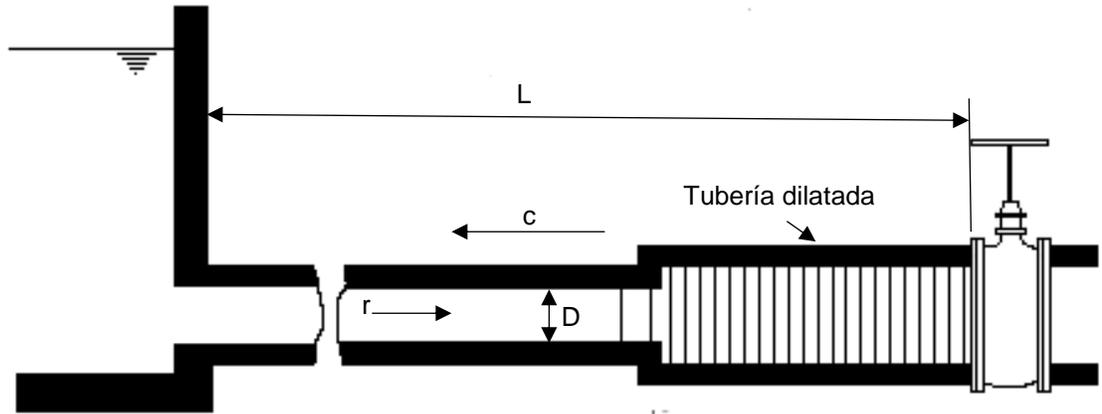
## **2.5 GOLPE DE ARIETE**

El golpe de ariete es un fenómeno transitorio y por tanto de régimen variable, en la que la tubería ya no es rígida y el líquido es compresible.

Este fenómeno se produce en los conductos al cerrar o abrir una válvula y al poner en marcha o parar una maquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente el caudal. Un caso importante ocurre en las centrales hidroeléctricas, donde se ha de reducir bruscamente el caudal suministrado a las turbinas hidráulicas acopladas a alternadores, cuando se anula la carga del alternador: en este caso la instalación debe proyectarse de manera que no se produzca un golpe de ariete excesivo.

La siguiente figura (Figura 2.14) representa una tubería de longitud  $L$ , espesor  $\delta$  y diámetro interior  $D$  por la que circula agua proveniente de un embalse y que termina en su extremo derecho en una válvula. Si ésta se cierra rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía, al disminuir la energía cinética, esta se va transformando en un trabajo de compresión del

fluido que llena la tubería y el trabajo necesario para dilatar esta última: se ha producido una sobrepresión o un golpe de ariete positivo.



**Figura 2.14** Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula;  $c$  es la velocidad de propagación de la onda y  $r$  la velocidad del flujo. La tubería se dilata o se contrae al avanzar la onda de presión.

Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión o golpe de ariete negativo.

Aunque es físicamente imposible cerrar una válvula instantáneamente, el estudio inicial del caso de cierre instantáneo ayuda al estudio de los casos reales.

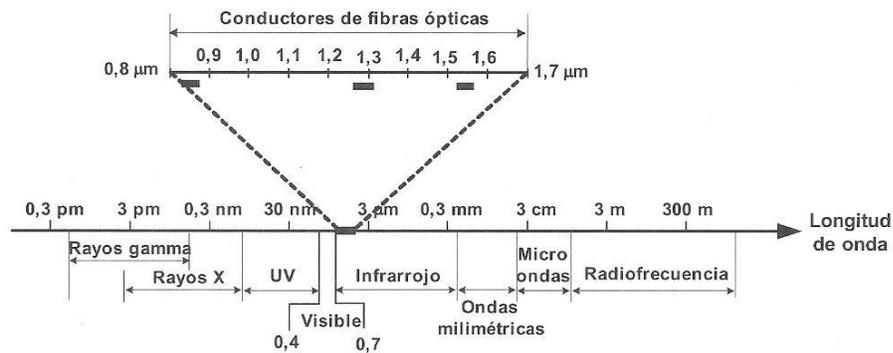
Al cerrarse por completo la válvula de la Figura 2.14, si dividimos imaginariamente todo el fluido que llena la tubería en rodajas, se quedara en reposo la primera rodaja y a continuación la segunda y así sucesivamente, necesitando un cierto tiempo. Es decir, en la válvula se ha originado una onda de presión que se propaga con velocidad  $c$ , la cual en el instante considerado tiene dirección contraria a la velocidad  $r$  del fluido; se ha creado una onda elástica, o sea una onda de presión que se propaga por la tubería, se refleja

en el embalse, vuelve a la válvula, de nuevo al embalse, y así sucesivamente, originando sobrepresiones y depresiones en la tubería, la cual se dilata o se contrae al paso de la onda.

Este elemento, es de vital importancia para las pruebas a realizar en esta investigación, ya que permitirá realizar mediciones en un sistema dinámico el cual puede cambiar sus rangos de presión, los cuales difícilmente se podrían encontrar o crear en un laboratorio.

## 2.6 LUZ

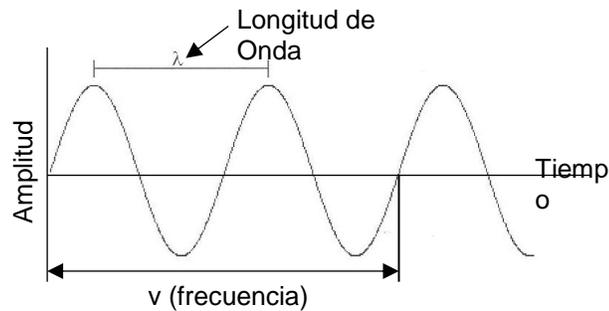
La luz es una onda electromagnética que ocupa una zona determinada dentro del espectro electromagnético [70] (Figura 2.15) y tiene dos características propias: una longitud de onda y una frecuencia [71]. La región más apropiada para trabajar con la fibra óptica se encuentra dentro del infrarrojo cercano (0.8  $\mu\text{m}$  y 1.7  $\mu\text{m}$ ) debido a que aquí se ven favorecidas sus propiedades de propagación [70].



**Figura 2.15** Espectro de las ondas electromagnéticas.

La longitud de onda ( $\lambda$ ) se define como la distancia que existe entre dos posiciones correspondientes de ondas adyacentes (Figura 2.16) y tiene como unidades de longitud: metros, centímetros, micrómetros, nanómetros y angstroms. La frecuencia ( $\nu$ ) se define como el número de ondas que pasan a

través de un punto por segundo, la unidad de la frecuencia es  $s^{-1}$  ó Hertz (Hz) [3].



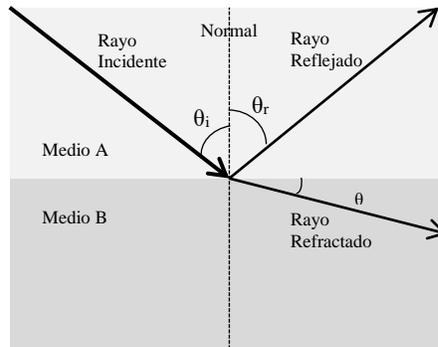
**Figura 2.16** Representación esquemática de la longitud de onda.

Un rayo de luz puede interactuar con una superficie en tres formas diferentes: reflejada, transmitida y absorbida. Algunas ocasiones pueden presentarse combinaciones de dos o hasta las tres formas.

### 2.6.1 REFLEXION Y REFRACCION

La luz puede interactuar con la materia de tres formas distintas: puede ser reflejada, transmitida (refractada) o absorbida. En muchos casos, una combinación de dos o tres de estos efectos suceden [71].

Cuando una onda luminosa choca con una interface lisa que separa a dos medios transparentes (como aire y vidrio o agua y vidrio), la onda en general se refleja parcialmente y se refracta (transmite) hacia el segundo medio, como se muestra en la Figura 2.17.



**Figura 2.17** Fenómenos de reflexión y refracción en un haz de luz incidiendo en la interface entre dos medios transparentes.

Si la superficie es plana y uniforme y el rayo de luz se refleja en una dirección determinada, entonces se dice que ocurre una reflexión especular. Si la superficie por el contrario es áspera o rugosa y ocasiona que los rayos de luz sean reflejados en una variedad de direcciones, se dice que es una reflexión difusa.

La reflexión es un redireccionamiento del vector de propagación de una onda de luz causada por una superficie. Si la reflexión sucede sobre una superficie lisa, entonces el ángulo del rayo de luz incidente,  $\theta_i$ , con respecto a la normal de la superficie es igual al ángulo del rayo de luz reflejado,  $\theta_r$ , con respecto a la misma normal. Esto se conoce como la ley de reflexión [71].

La luz es transmitida si el medio es transparente para esa longitud de onda en particular. Diferentes medios son transparentes a diferentes regiones del espectro. La luz es absorbida si la energía de la luz es igual a la diferencia entre dos estados de energía del material involucrado [71].

Cuando un rayo de luz incidente pasa a otro medio se produce el fenómeno de la **refracción**. El **índice de refracción** de un medio ( $n$ ), es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío ( $C_0=2.99792458 \times 10^8$  m/s) y el medio ( $C$ ):

$$n = \frac{C_o}{C} \dots\dots\dots (2.4)$$

El índice de refracción es una constante material del medio y en el vacío (≈aire) vale:  $n_o=1$ . En la Tabla 2.3 se presentan los valores del índice de refracción de diferentes medios.

**Tabla 2.3** Índice de refracción de diferentes medios.

<b>Material</b>	<b>Índice de refracción (n)</b>
Vacío	1.0000
Aire (0°C, 1 atm)	1.00029
Hidrogeno (0°C, 1 atm)	1.00013
Dióxido de carbono	1.20
Agua (0-20°C)	1.333
Alcohol Eílico	1.36
Aceite de olivo	1.47
Solución de azúcar (30-80%)	1.38-1.49
Acrílico	1.49
Benzeno	1.50
Cloruro de Sodio	1.5
Diamante	2.42

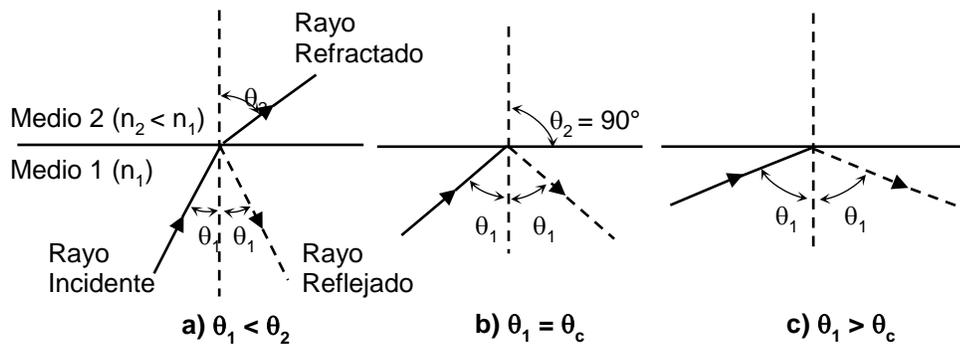
Si el rayo luminoso incide desde un medio 1 con índice de refracción  $n_1$  sobre otro medio 2 (Figura 2.18), con índice de refracción  $n_2$ , tal que  $n_1$  sea mayor que  $n_2$ , una cierta parte del rayo incidente se refracta como se muestra en la Figura 2.14a. La expresión matemática que describe el fenómeno de la refracción es conocida como la **Ley de refracción de Snell** [70].

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{c_1}{c_2} \dots\dots\dots (2.5)$$

Donde  $c_1$  y  $c_2$  son la velocidad de la luz en los medios 1 y 2, respectivamente.  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , son los ángulos de incidencia y de refracción, respectivamente. Como  $n_1 = \frac{c_0}{c_1}$  y  $n_2 = \frac{c_0}{c_2}$ , despejando de aquí  $c_1$  y  $c_2$  y sustituyendo en la expresión anterior, se obtiene otra forma más habitual de expresar la Ley de refracción de Snell.

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots (2.6)$$

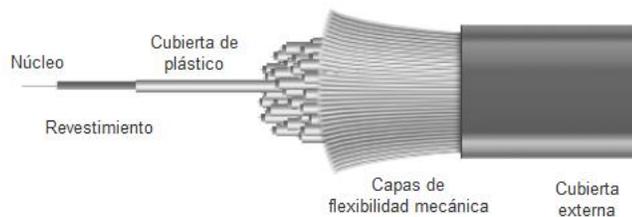
Cuando el rayo luminoso incide con un ángulo igual de valor  $\theta_c$  conocido como ángulo crítico, el rayo refractado se propaga paralelamente a la superficie de separación de los dos medios (Figura 2.14b). Como  $\theta_2=90^\circ$ , de la expresión (2.5) tenemos que el valor del ángulo crítico es:  $\theta_c=\text{arcsen}(n_2/n_1)$ . Para ángulos mayores que  $\theta_c$  el rayo incidente es enteramente reflejado (Figura 2.14c). Este fenómeno se conoce como reflexión interna total y es la base para la propagación confinada de la luz en los conductores de fibra óptica. La reflexión interna total se produce sólo cuando el rayo incidente incide desde un medio con un índice de refracción mayor sobre otro de índice menor y nunca en el caso inverso [70].



**Figura 2.18** Fenómenos de reflexión y refracción de la luz.

## 2.7 FIBRA OPTICA

“Una fibra óptica es una guía de onda cilíndrica dieléctrica hecha de materiales con pérdidas (información) extremadamente pequeñas como el vidrio” [72]. Un conductor de fibra óptica (Figura 2.19) consiste en dos cilindros concéntricos, el cilindro interior se le denomina **núcleo** que es la parte interna de la fibra en donde se produce la propagación de la onda de luz. Al cilindro exterior se le denomina **envoltura o revestimiento** el cual tiene la característica de tener un índice de refracción constante y un poco menor que el del núcleo con lo cual refleja la luz hacia el centro de la fibra y la contiene en el núcleo; el núcleo y el revestimiento suelen estar protegidos por un **recubrimiento** el cual proporciona protección y flexibilidad mecánica a la fibra [63, 70].



**Figura 2.19** Estructura típica de una fibra óptica.

### 2.7.1 CLASIFICACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

El cable de fibra, por su composición se clasifica en tres tipos disponibles actualmente:

- Núcleo de plástico y recubrimiento plástico (POF, Plastic Optical Fiber).
- Núcleo de vidrio con recubrimiento de plástico (PCS, Plastic Clad Silica).
- Núcleo de vidrio y recubrimiento de vidrio (SCS, Silica Clad Silica).

En el mundo de las telecomunicaciones, las fibras del tipo SCS son las más valoradas debido a que ofrecen un valor más bajo de atenuación y una mayor capacidad de transmisión.

Las fibras ópticas utilizadas actualmente en el área de las telecomunicaciones se clasifican fundamentalmente en dos grupos según el modo de propagación:

- *Fibras Multimodo (Multimode Fiber, MMF)*. Son aquellas fibras ópticas que pueden guiar y transmitir varios rayos de luz por sucesivas reflexiones (modos de propagación). Dentro de sus características particulares este tipo de fibra presenta un diámetro mucho mayor (entre 50-200  $\mu\text{m}$ ) en comparación con una fibra monomodo (10  $\mu\text{m}$ ) y por consecuencia un ancho de banda mayor para el transporte de información.
  
- *Fibras Monomodo (Singlemode Fiber, SMF)*. Son todas aquellas fibras ópticas que por su especial diseño pueden guiar y transmitir un único rayo de luz (un modo de propagación) a través de su núcleo. Cabe mencionar que este tipo de fibra ofrece un menor ancho de banda de información en su interior, pero lo compensa con una mayor distancia de transmisión y poca pérdida de información, con respecto a una fibra multimodo.

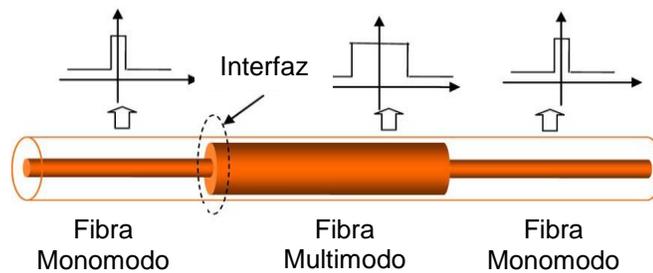
### 2.7.2 INTERFERENCIA MULTIMODAL (MMI)

Se define como interferencia a la superposición de dos o más ondas y su combinación para formar una onda única. Cuando la longitud de onda de ambas es igual y existe una diferencia de fase constante entre ellas se denominan ondas coherentes. Si la diferencia de fase es un múltiplo entero de  $\lambda$  (longitud de onda), se produce una suma de sus amplitudes, mientras que, si esa diferencia es un múltiplo entero de  $\lambda/2$ , una resta y, si sus amplitudes son iguales, se produce una anulación local de las ondas [2].

El principio fundamental del que parte la técnica MMI es del fenómeno de autoimagen (*self-imaging*). El cual se puede definir como: “la propiedad de las guías de onda multimodales en la cual un perfil de campo de entrada es reproducido en una o múltiples imágenes en intervalos periódicos de tiempo a lo largo de la dirección de propagación de la guía de onda” [11]. La reproducción de imágenes se debe a la interferencia constructiva que se presenta a lo largo de la guía de onda.

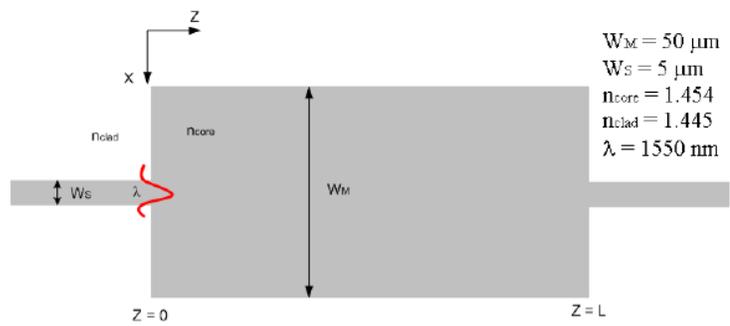
La generación de autoimágenes en guías de ondas planas pueden ser analizadas utilizando el análisis de modos de propagación (modal propagation analysis, MPA por sus siglas en inglés) [49], bajo un método híbrido [19], y mediante el método de propagación de haz (beam propagation method, BPM por sus siglas en inglés) [23].

La estructura de un arreglo MMI consiste en una guía de onda multimodal unida en los extremos a guías de onda monomodal. La Figura 2.20 muestra una estructura SMS típica (**S**inglemode – **M**ultimode – **S**inglemode).



**Figura 2.20** Arreglo típico de una estructura SMS. La fibra multimodal se encuentra unida en sus extremos a fibras monomodales.

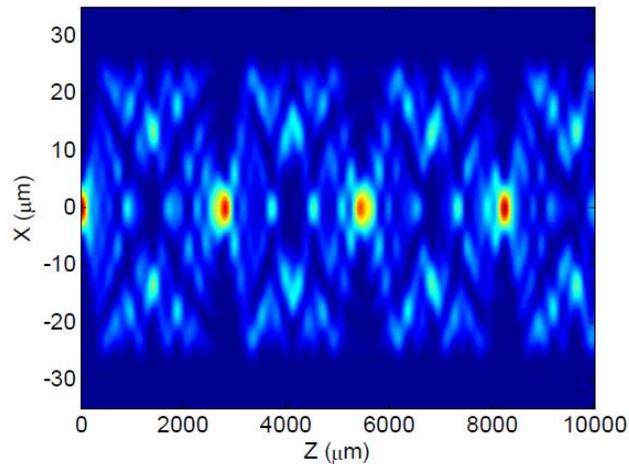
Los parámetros y dimensiones de las guías de onda se presentan en la Figura 2.21, donde el ancho de la sección MMF (multimode fiber) es  $W_M$  y el ancho de la sección SMF (singlemode fiber) es  $W_S$ . El largo de la guía multimodal es  $L$ . Haciendo uso del MPA [4], un perfil de campo entrando en  $Z = 0$  se descompondrá en una distribución modal de todos los modos posibles dentro de la guía de onda MMF. El perfil de campo a la distancia  $Z = L$  puede ser expresado como una superposición de la distribución modal de todos los modos posibles. Bajo ciertas circunstancias, el perfil de campo a  $Z = L$  será una reproducción o una “*autoimagen*” del perfil de entrada en  $Z = 0$  [58].



**Figura 2.21** Diagrama esquemático de una guía de onda MMF empalmada entre dos secciones de guía SMF conformando de esta forma una hetero-estructura SMS de fibra óptica [19].

La Figura 2.22 muestra la distribución del campo de entrada a lo largo de la sección multimodal (MMF) y se puede observar que la auto-imagen del perfil

de entrada se repite en intervalos periódicos definidos, presentándose a las longitudes de ondas de: 2708, 5415 y 8122  $\mu\text{m}$ . Imágenes múltiples (*multi-fold images*) de la distribución de campo de entrada también se pueden observar, la generación de la proyección de dos imágenes se pueden encontrar a los 1354, 4062, 6770 y 9478  $\mu\text{m}$ . La generación de auto-imágenes ocurre a distancias específicas de la sección MMF y sólo para ciertas longitudes de onda [58]. La respuesta espectral de un dispositivo basado en MMI es por lo tanto no plana y, de hecho, presenta una respuesta espectral de tipo pasa-banda, en donde la longitud de onda donde se presenta el máximo (pico) de la respuesta pasa-banda corresponde al valor de la longitud de onda en donde distancia de la auto-imagen es exactamente igual a la longitud de la sección multimodal [19].



**Figura 2.22** Distribución del campo dentro de la sección MMF mostrando la generación de auto-imágenes del perfil de entrada a intervalos específicos de distancia sobre la guía de onda [47].

La sección MMF puede soportar muchos modos guiados y, por tanto, un campo de entrada acoplado a la sección MMF puede reproducirse como una sola auto-imagen, o bien, como múltiples auto-imágenes en intervalos periódicos del vector de propagación de la guía de onda MMF como

consecuencia de la interferencia entre todos los modos guiados. Con el fin de obtener una sola imagen, la diferencia de fase entre todos los modos de propagación tiene que ser un número entero múltiplo de  $2\pi$ , de manera que todos los modos interfieran en fase y así el campo de entrada se pueda reproducir. Este efecto ha sido ampliamente investigado [62] y la distancia (longitud,  $L$ ) en dónde las auto-imágenes se formarán está dada por la siguiente ecuación, donde  $p$  es el número de autoimagen.

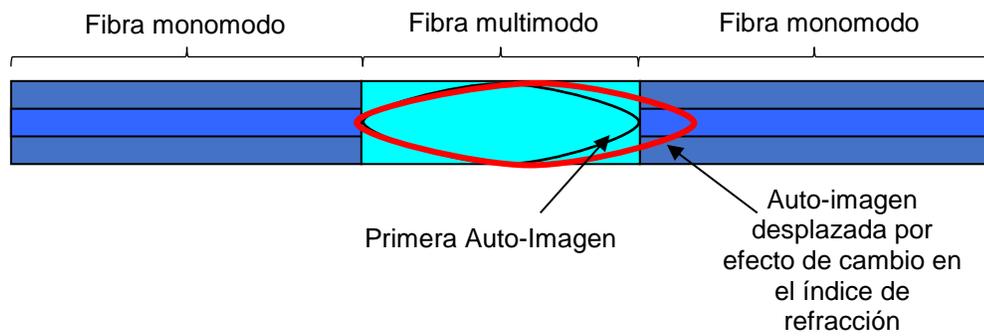
$$L = p \left( \frac{3L_{\pi}}{4} \right), \quad p = 0,1,2, \dots \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

donde  $L_{\pi}$  es el ancho de pulso:

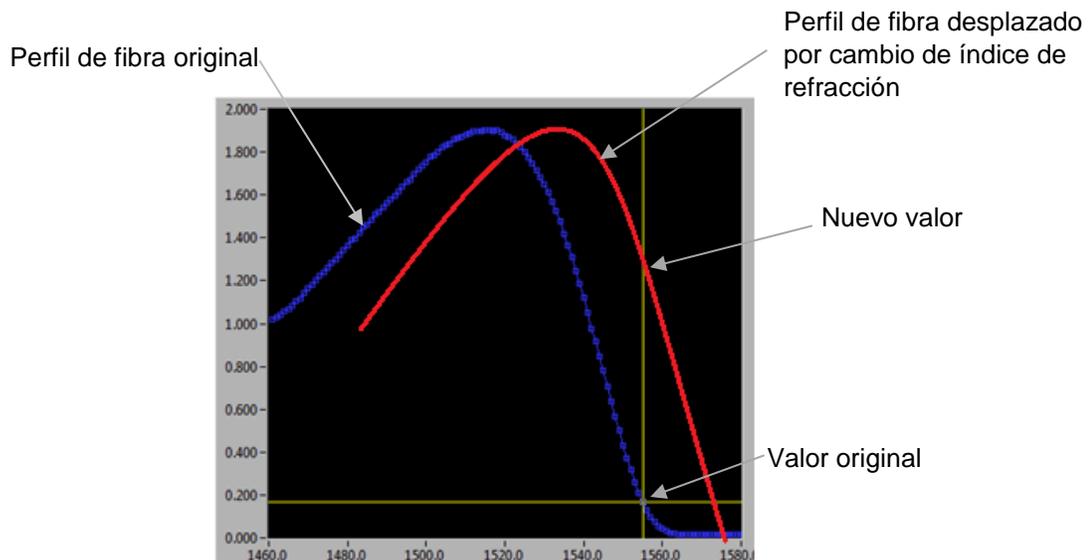
$$L_{\pi} \cong p \left( \frac{4n_{MMF} D_{MMF}^2}{3\lambda_0} \right) \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

En la ecuación anterior  $n_{MMF}$  y  $D_{MMF}$  corresponden respectivamente al índice de refracción y al diámetro del núcleo de la sección MMF, con  $\lambda_0$  como la longitud de onda específica a la cual se desea caracterizar la estructura SMS.

El tipo de fibra MMI está diseñada para que el haz se acople al núcleo de la fibra monomodo (Figura 2.23), al modificarse el índice de refracción de la fibra MMI por alguna acción física (imagen en negro) esta se desplazaría del núcleo de la fibra monomodal (imagen en rojo), la auto-imagen se desplaza y su valor cambia (Figura 2.24).



**Figura 2.23** Fibra diseñada para la primera imagen.



**Figura 2.24** Perfil de una fibra MMI diseñada a la primera imagen y un diodo láser emitiendo a 1555 nm. Al cambiar el índice de refracción de la fibra, la imagen se desplaza hacia la derecha; esto cambia el valor que se tenía originalmente a 1555 nm a valores mayores.

# CAPITULO 3

## METODOLOGÍA Y

## ARREGLOS EXPERIMENTALES

---

A lo largo de este capítulo se describen los procesos utilizados durante la presente investigación para la fabricación de fibras, diseño de moldes, fabricación de membranas, el desarrollo de pruebas para la calibración del sensor y pruebas finales.

El sensor que se presenta en esta investigación está conformado por los siguientes elementos:

- Fibra SMS (monomodo – multimodo – monomodo por sus siglas en ingles).
- Molde para fabricar la membrana.
- Membrana hecha de PDMS (polidimetil siloxano).
- Cuerpo del sensor (colector).
- Etapa de adquisición, transformación a voltaje y despliegue de datos.

También se encontrará con una descripción acerca del golpe de ariete, el cual, proporciona el ambiente necesario para realizar pruebas al sensor. Como parte final, se presentan los métodos para la calibración del sensor óptico y su comparación ante un sensor comercial.

### **3.1 FABRICACIÓN DE FIBRAS SMS (monomodo – multimodo – monomodo)**

El diseño para la fabricación de este tipo de fibra partirá del uso de un láser con una longitud de onda de 1550 nm, se fijó este parámetro basado en que la fibra que se usará es la SMF – 28, la cual tiene su mejor transmitancia en esa línea óptica.

El proceso para la fabricación de fibras SMS es el siguiente:

1. Se toma un tramo de fibra SMF – 28 (8.2  $\mu\text{m}$  diámetro de núcleo con índice de refracción a 1550 nm de 1.4682, 125  $\mu\text{m}$  de diámetro de revestimiento) y se retira el revestimiento para dejar al descubierto el núcleo y se prepara para empalmar utilizando una cortadora de fibra óptica.
2. Utilizando una sección de fibra multimodo (125  $\mu\text{m}$  diámetro de núcleo e índice de refracción de 1.444) mayor a 20 mm de largo y se prepara para empalmarla a la fibra monomodo. El largo final de la fibra multimodo dependerá de la siguiente formula:

$$L = \frac{16Pn_c r^2}{\lambda}$$

Donde:

P = número de autoimagen a utilizar [73].

$n_c$  = índice de refracción de la fibra multimodal.

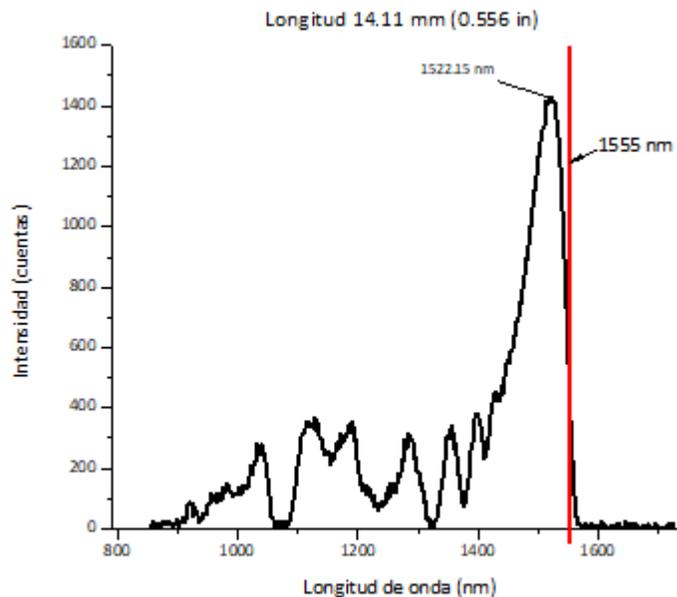
r = radio del núcleo de la fibra multimodal.

$\lambda$  = longitud de onda específica.

3. Determinada la distancia, se ajusta y se corta la fibra multimodo para después empalmarla a otra sección de fibra monomodo de las mismas características que la primera.

La forma en que se caracterizan las fibras es con ayuda de una fuente de luz blanca, un espectrofotómetro y software especializado (Ver Apendice).

A continuación, se muestran los resultados que se obtuvieron de la fabricación de las fibras SMS, cabe hacer mención que se busca que la longitud de onda del diodo láser (1555 nm) coincida con el punto más alto del perfil de la fibra. Las fibras fabricadas a 14.11 mm muestran lo siguiente:



**Gráfica 3.1** Perfil de valores de intensidad de fibra SMS.

De la gráfica anterior se observa que el máximo valor se encuentra a 1520.45 nm, quedando por debajo de la longitud de onda de operación (1555 nm). Se recurre a la siguiente fórmula (3.1) para determinar si la longitud es la correcta.

$$L = \frac{16Pn_c r^2}{\lambda} \tag{3.1}$$

Los valores a utilizar son los siguientes:

P = el número de autoimagen es  $\frac{1}{4}$ .

$n_c = 1.44$  es el índice de refracción de la fibra.

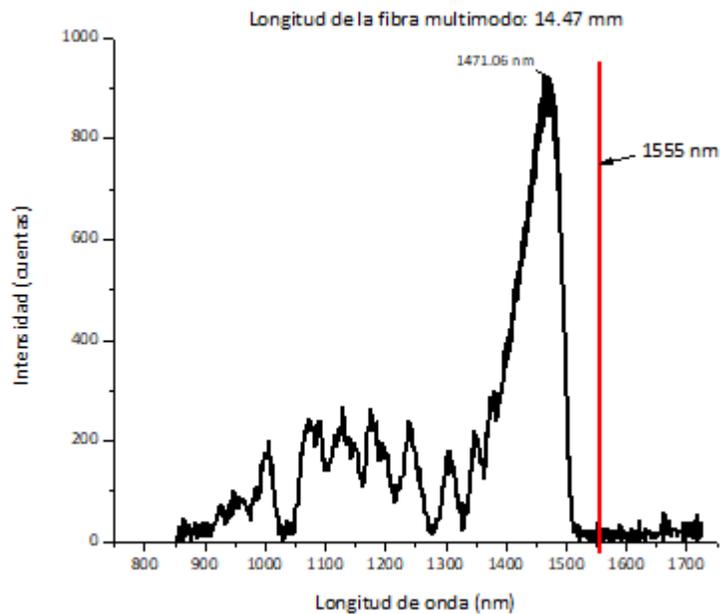
$r =$  radio del núcleo de la fibra multimodal  $\frac{125 \times 10^{-6}}{2} = 62.5 \times 10^{-6}$ .  
 $\lambda = 1555$  nm que es la longitud de onda con la que se trabajará.

$$L = \frac{(16) \left(\frac{1}{4}\right) (1.44) (62.5 \times 10^{-6} \text{ m})^2}{1555 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$L = 0.01447 \text{ m}$$

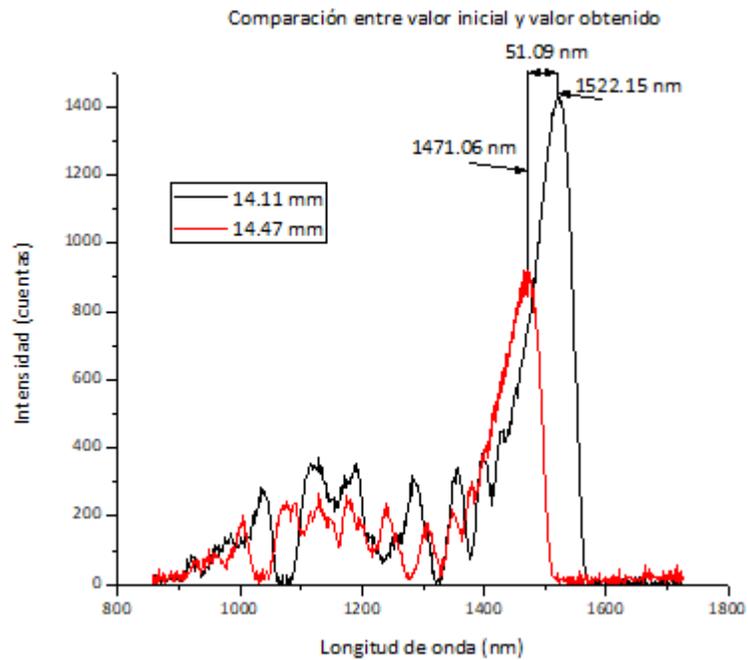
$$L = 14.47 \text{ mm (0.569 in)}$$

La nueva longitud es de 14.47 mm, por lo tanto, se procede a fabricar fibras con la nueva distancia.



**Gráfica 3.2** Perfil de la fibra SMS de 14.47 mm.

Se observa una diferencia notable entre la distancia de la fibra original con la calculada (Gráfica 3.3).

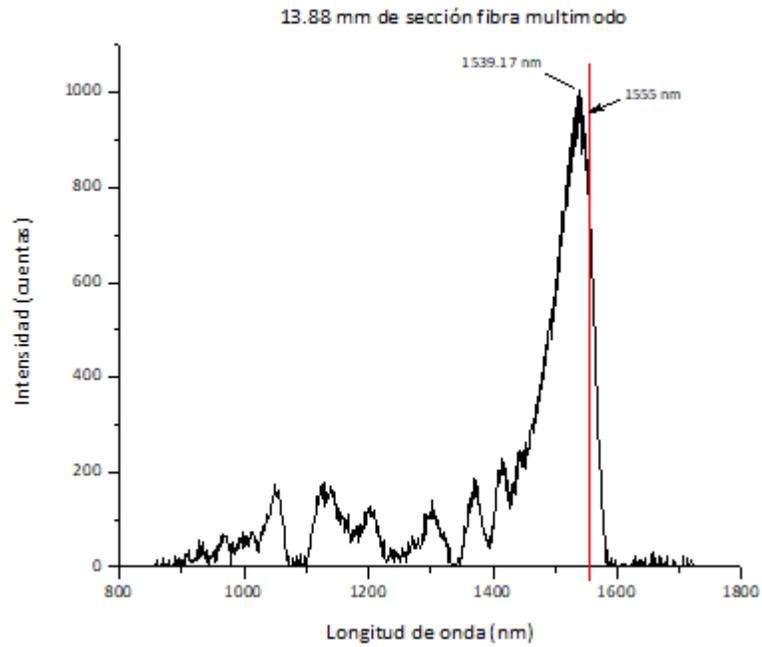


**Gráfica 3.3** Comparación entre las fibras SMS.

Para avanzar 51.09 nm se requieren 0.36 mm, si se considera la longitud inicial de 14.11 mm y su máximo en 1522.15 nm, se utiliza una regla de tres para determinar la longitud a 1555 nm.

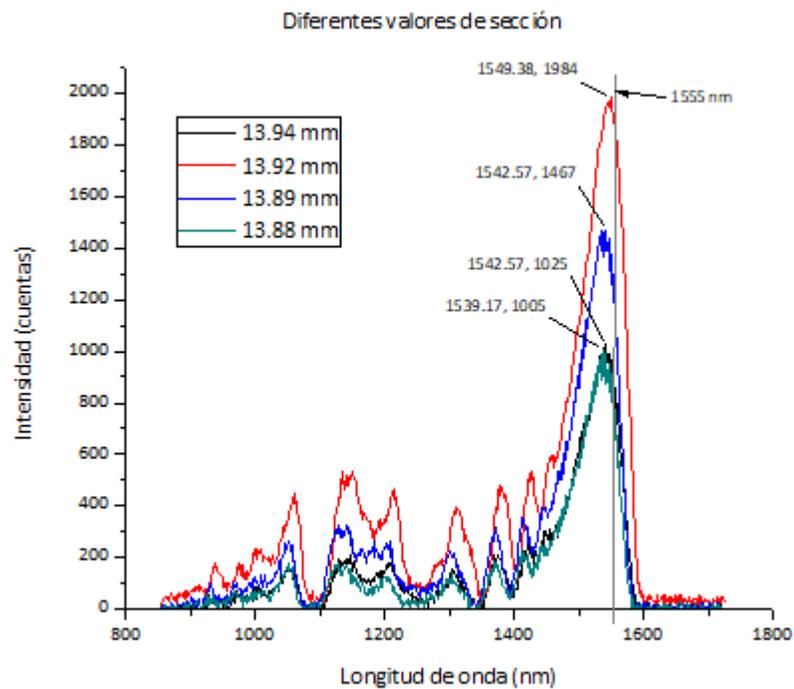
$$\begin{aligned}
 51.09 \text{ nm} &\rightarrow 0.36 \text{ mm} \\
 32.85 \text{ nm} &\rightarrow x \\
 x &= \frac{(32.85 \text{ nm}) \cdot (0.36 \text{ mm})}{51.09 \text{ nm}} \\
 x &= 0.231 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

De acuerdo al resultado, se necesita disminuir la distancia 0.231 mm más, ya que, de acuerdo a las gráficas anteriores, entre menor sea la distancia de la sección multimodo más se acerca a 1555 nm. La nueva medida será 13.88 mm.



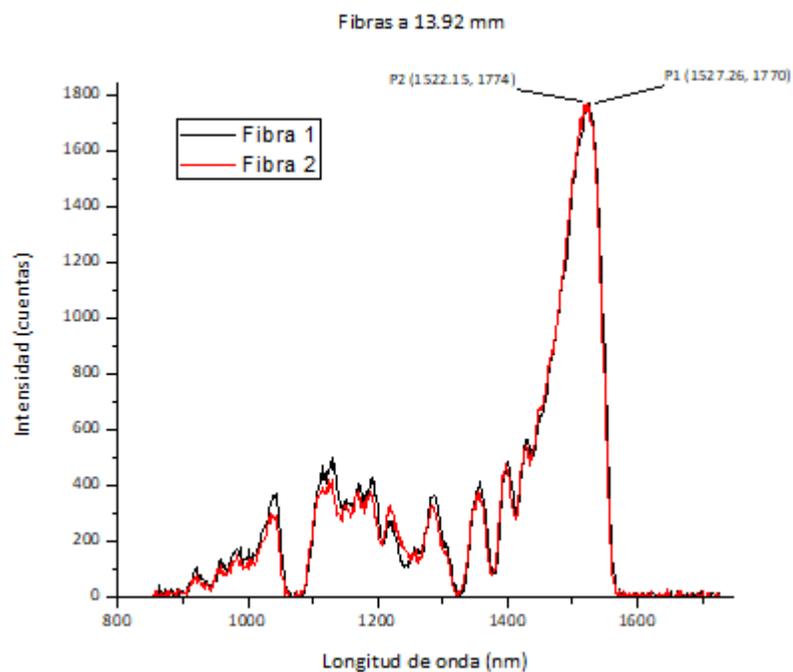
**Gráfica 3.4** Perfil de una fibra SMS con sección multimodo de 13.88 mm.

En la gráfica anterior se observa que la nueva distancia no se acerca a la longitud de onda deseada. Se fabrican más fibras SMS pero ahora tomando valores por encima del valor de la distancia obtenida con la fórmula (Gráfica 3.5)



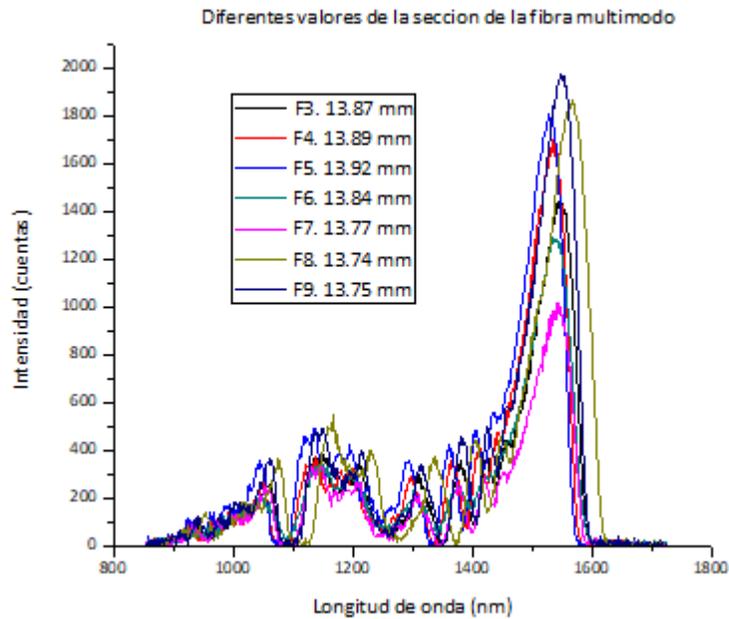
**Gráfica 3.5** Perfiles de fibras SMS con diferente valor de longitud multimodo.

La grafica anterior demuestra que la fibra que se acerca a 1555 nm es en donde se utilizó una sección de 13.92 mm (0.548 mm) con la que se obtiene una intensidad de 1984 cuentas. Se fabrican dos fibras para comparar resultados y se obtiene lo siguiente (Gráfica 3.6):



**Gráfica 3.6** Perfil de fibras SMS fabricadas a 13.92 mm.

El resultado no fue el que se esperaba, el máximo valor de intensidad se encuentra alejado de 1555 nm, se repite la fabricación de las fibras, pero ahora se reducen más los valores de la distancia para la fibra multimodo (Gráfica 3.7).



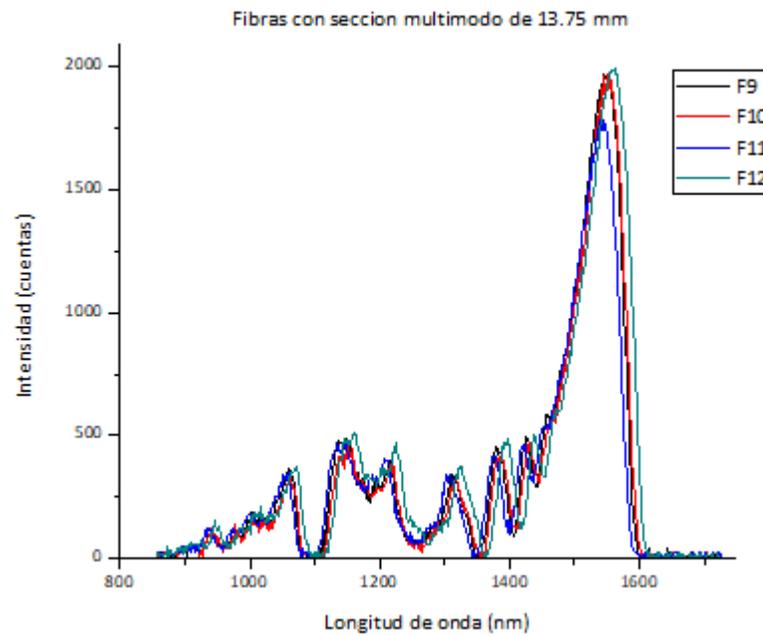
**Gráfica 3.7** Perfil de fibras SMS reduciendo la longitud de la sección multimodo.

Con la gráfica anterior se puede construir la siguiente tabla (Tabla 3.1), en la cual se indica el valor máximo y en que longitud de onda sucede. Las fibras que se encuentran sombreadas son las que obtuvieron mejores resultados, solo que durante su manejo sufrieron daño y dejaron de funcionar. Se optó por seleccionar la fibra 9, la cual a pesar de tener su máximo valor de intensidad a menor longitud de onda que la fibra 5, su valor de intensidad es mayor al de esta última.

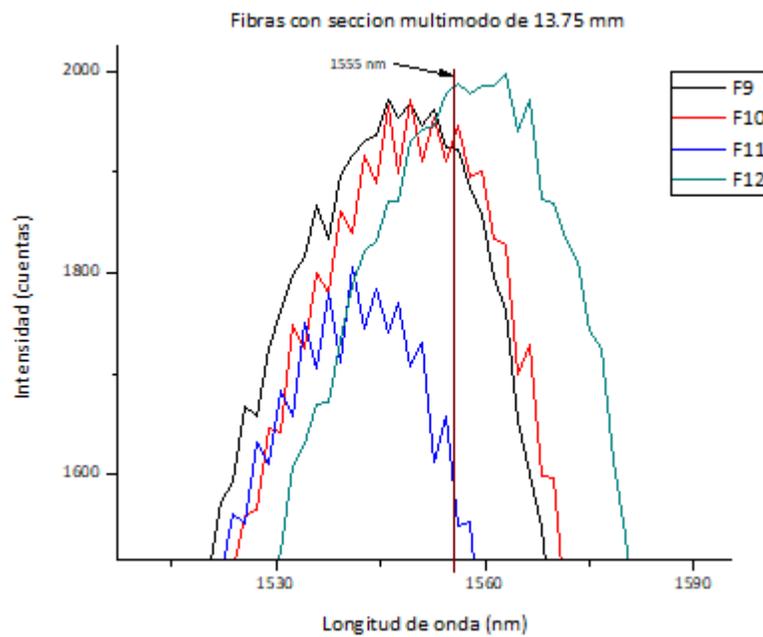
**Tabla 3.1** Valores de intensidad de las fibras.

# FIBRA	INTENSIDAD (cuentas)	LONGITUD DE ONDA (nm)
3	1440	1542.57
4	1700	1532.36
5	1435	1549.38
6	1288	1532.36
7	1391	1556.19
8	1862	1568.09
9	1971	1545.98

Con la fibra seleccionada, se procede a fabricar tres fibras más (F10, F11 y F12) con la finalidad de saber si las características obtenidas son reproducibles. Los resultados se presentan en las gráficas siguientes (Gráfica 3.8 y Gráfica 3.9), y los valores máximos de intensidad se presentan en la tabla correspondiente (Tabla 3.2). Estas últimas cuatro fibras son con las que se trabajará a lo largo del proyecto.



**Gráfica 3.8** Perfil de las fibras SMS fabricadas.



**Gráfica 3.9** Acercamiento de los perfiles a una longitud de onda de 1555 nm.

**Tabla 3.2** Valores de intensidad de las fibras SMS.

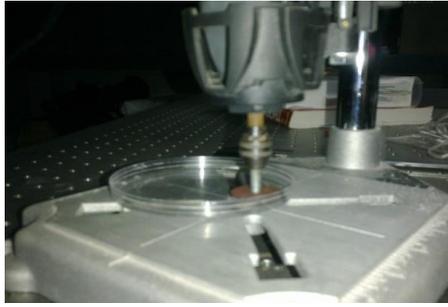
# FIBRA	INTENSIDAD (cuentas)	LONGITUD DE ONDA (nm)
9	1971	1545.98
10	1971	1549.38
11	1806	1540.87
12	1996	1562.99

### **3.2 FABRICACION DE MOLDES PARA MEMBRANA**

Para el proceso de fabricación de los moldes para las membranas, se utiliza una caja Petri (8.6 cm de diámetro x 1.5 cm de alto) en donde después, se colocará el material flexible (PDMS) y la fibra SMS.

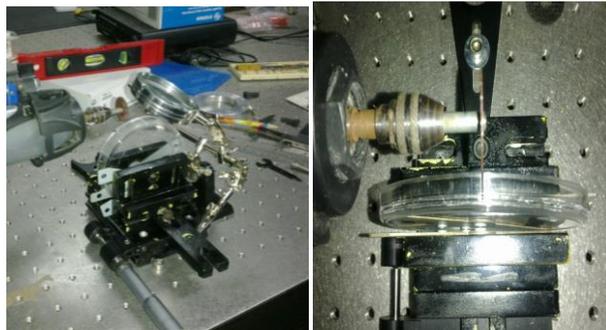
Para la fabricación del molde se siguen los pasos que a continuación se describen:

- Se marca la altura de llenado que se requiera de PDMS (esta altura representará el grosor de la membrana) y posteriormente se marca la mitad de esa altura que es la que servirá de referencia para colocar la fibra SMS.
- Se coloca el molde en la base para taladro, posteriormente se realizan marcas alrededor del molde con ayuda de un disco de esmeril (Figura 3.1). Con esto se obtiene la altura total de la membrana y la altura donde se colocará la fibra SMS. Estas marcas proporcionan la referencia que asegurará que la membrana estará a nivel y no se tendrán lados más gruesos que otros.



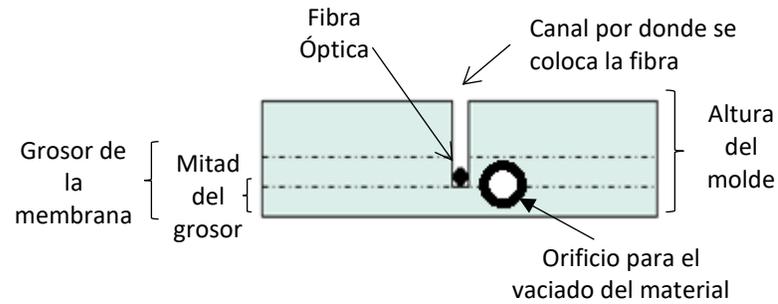
**Figura 3.1** Marcas de la altura total y de referencia para la fibra.

-Se realiza un corte transversal del exterior hacia el interior hasta la mitad de la membrana. Este corte generará un canal que permitirá colocar la fibra SMS antes del vaciado del PDMS (Figura 3.2). Por último, se hace un orificio de 3 mm de radio, por el cual se vaciará el material de la membrana.



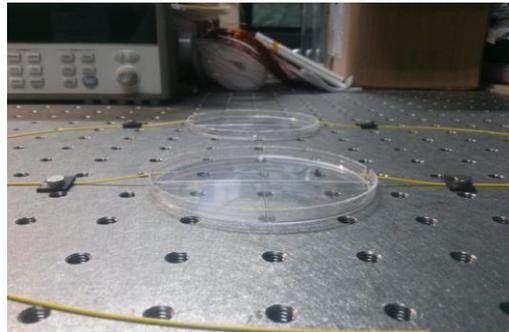
**Figura 3.2** Cortes transversales al molde.

En la Figura 3.3 se pueden observar las partes del molde, para cualquier altura de membrana los pasos son idénticos, en cuanto al ancho del canal – donde se deposita la fibra óptica – depende del ancho del disco de corte.

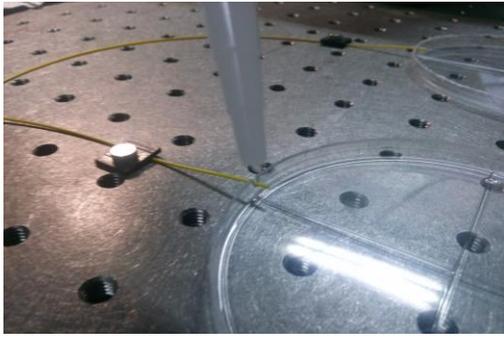


**Figura 3.3** Diagrama de las partes que conforman el molde.

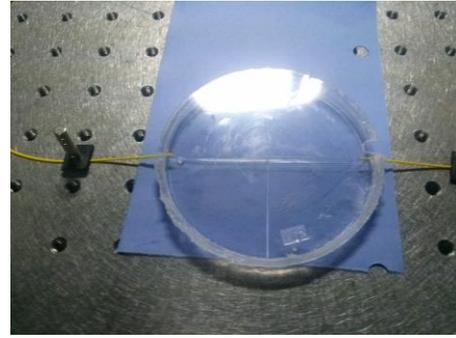
Los moldes una vez terminados se colocan en la mesa de trabajo, se coloca la fibra SMS y se tensa con ayuda de imanes (Figura 3.4); se coloca silicón en las ranuras, se coloca la tapa y se sella con silicón (Figura 3.5 y 3.6) cuidando de no tapar el orificio por donde se vaciará el material de la membrana.



**Figura 3.4.** Moldes terminados con imanes colocados a ambos lados de la fibra SMS.



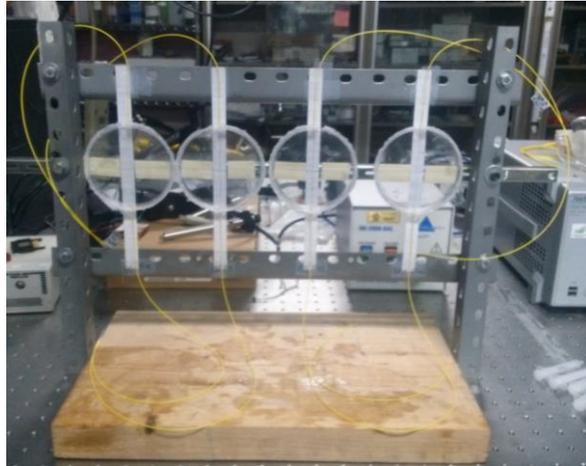
**Figura 3.5.** Se agrega silicón en las ranuras.



**Figura 3.6.** Molde sellado.

Una vez sellado el molde, se esperan por lo menos 12 horas para que el silicón seque, posteriormente se montan los moldes en un arreglo en el cual, los moldes se colocan en posición vertical para ser llenados. La Figura 3.7 describe el arreglo para colocar hasta 4 moldes al mismo tiempo, el cual consta de una base de madera 24 cm x 44 cm que funciona como base, y 4 secciones de tubos con ranuras (utilizados para armar estantes) dos secciones de 39 cm que sirven como postes verticales donde se fijaran las secciones horizontales, dos secciones de 48 cm que se colocan en forma horizontal distanciados 22 cm uno respecto al otro en donde se colocará parte de la fibra monomodo para estirla y evitar que la fibra SMS se flexione, y por ultimo una sección de 62 cm de largo, la cual se coloca en el centro de las secciones horizontales, la cual sirve para fijar los moldes.

Con el arreglo propuesto, se obtiene una mayor manejabilidad, ya que los moldes se encuentran sujetos a una base, la cual por su geometría es más fácil de mover a cualquier punto sin necesidad de quitar los moldes y existe la posibilidad de estar monitoreando hasta los cuatro moldes sin ningún inconveniente.



**Figura 3.7.** Arreglo para el vaciado de PDMS en forma vertical.

### **3.3 ELABORACION DE MEMBRANAS**

El material utilizado en la elaboración de membranas para esta investigación es un elastómero transparente a base de silicon llamado polidimetil siloxano sylgard 184 (PDMS) marca Dawn Corning. La fabricación de membranas hechas de este material polimérico es relativamente fácil y su uso como material reduce el tiempo y complejidad en la elaboración de prototipos, evitando el uso de equipos sofisticados [74, 75]. Por las propiedades que posee el PDMS lo hace ideal para emplearlo en el área de la óptica [76].

El proceso para la elaboración de membranas es el siguiente:

Para la preparación del PDMS se debe agregar su catalizador (Sylgar 184 Silicone Elastomer Curing Agent), el cual se utiliza en una relación 10:1; esto quiere decir que por cada gramo de PDMS a utilizar se debe agregar a la mezcla 0.1 gramo de catalizador (Figura 3.8). Los componentes se pesan en una balanza analítica (ver Apéndice).



**Figura 3.8.** PDMS, catalizador y balanza.

Se debe tener cuidado con el recipiente donde se mezclan los elementos, ya que en recipientes de cristal o metal la mezcla se adhiere a ellos y se hace complicado retirar la mezcla de ellos. La mezcla colocada en un recipiente de plástico se debe mezclar hasta obtener una sustancia libre de burbujas de aire. Se utiliza un agitador de vórtice (ver Apéndice) por 5 minutos (Figura 3.9) para posteriormente introducirlo a un baño ultrasónico (ver Apéndice) por otros 5 minutos (Figura 3.10) para este último paso se debe considerar tapan el recipiente para evitar que la mezcla se derrame dentro del equipo, todo esto con la finalidad de obtener una mezcla homogénea y eliminar burbujas de aire (Figura 3.11).



**Figura 3.9.** Mezcla colocada en el agitador de vórtice.



**Figura 3.10.** Baño ultrasónico.



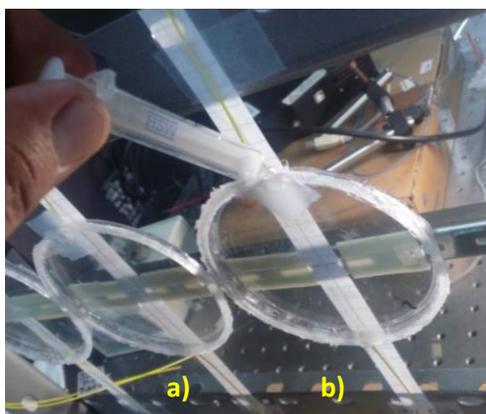
a)



b)

**Figura 3.11.** a) Mezcla iniciando el proceso de agitación, b) mezcla con burbujas de aire.

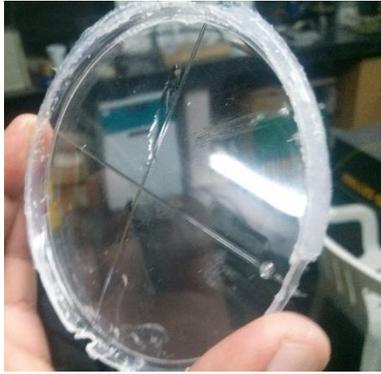
Terminado el proceso de agitación, se utiliza una jeringa de 3 mililitros para vaciar la mezcla en el molde que previamente se coloca en el arreglo para vaciado vertical (Figura 3.12).



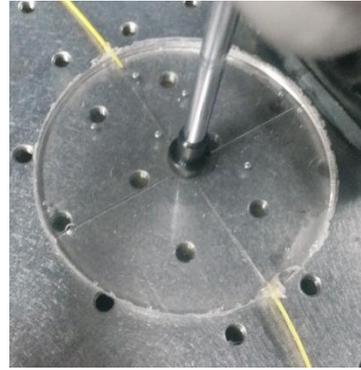
**Figura 3.12.** a) Con ayuda de la jeringa se vacía la mezcla en el molde,  
b) Membranas vaciadas.

Es importante observar que no exista presencia de burbujas cerca de los empalmes entre las fibras monomodo y multimodo; cualquier burbuja en esta zona puede afectar el resultado final, inclusive dañar la fibra al momento del curado.

Se debe dejar curar la membrana mínimo 48 horas a temperatura ambiente para posteriormente retirarla del arreglo de vaciado, después se retira el silicón que sella las tapas (Figura 3.13) para después sacar la membrana del molde (Figura 3.14).



**Figura 3.13.** Molde vacío.



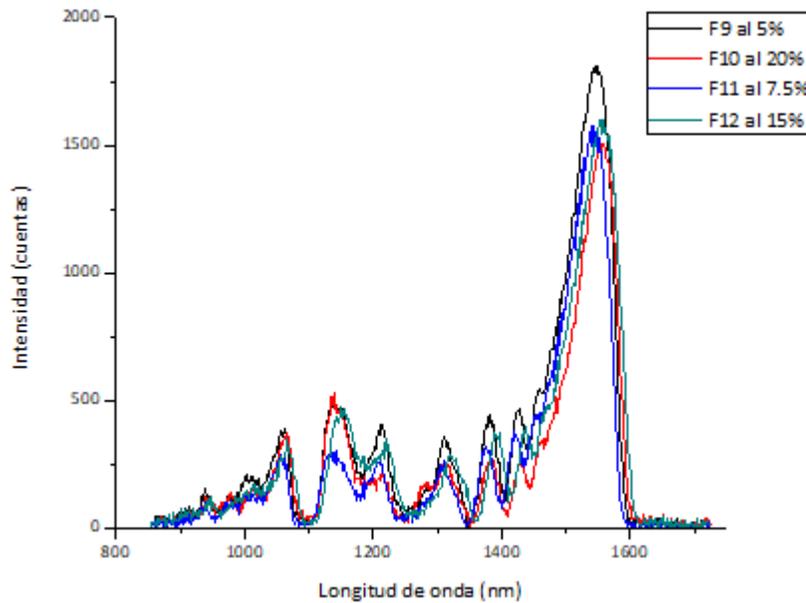
**Figura 3.14.** Membrana lista.

Seleccionadas las fibras con las que se trabajará, se colocan en moldes de 5.5 mm de espesor para la fabricación de las membranas de PDMS; se modificará la relación de catalizador entre membranas con la finalidad de caracterizarlas y comprender su funcionamiento. En la siguiente tabla (Tabla 3.3) se muestran las relaciones de PDMS y catalizador para cada fibra.

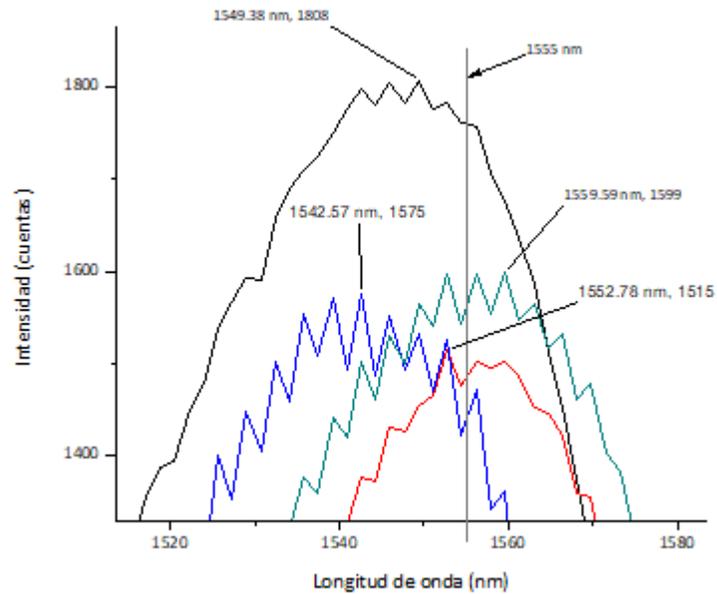
**Tabla 3.3** Características de las membranas a fabricar.

Fibra No.	Relación de catalizador	Porcentaje de catalizador	PDMS utilizado (gramos)	Catalizador utilizado (gramos)	Total (gramos)
9	10:0.5	5%	35	1.75	36.75
10	10:2	20%	35	7	42
11	10:0.75	7.5%	37.15	2.786	39.936
12	10:1.5	15%	35	5.25	40.25

Una vez que las fibras están colocadas en los moldes, se procede a tomar sus valores de intensidad ya en posición vertical antes de vaciar el material (PDMS). La grafica siguiente (Grafica 3.10) muestra los valores obtenidos sin material, esto con la finalidad de poder observar posibles cambios en sus valores de longitud de onda e intensidad.



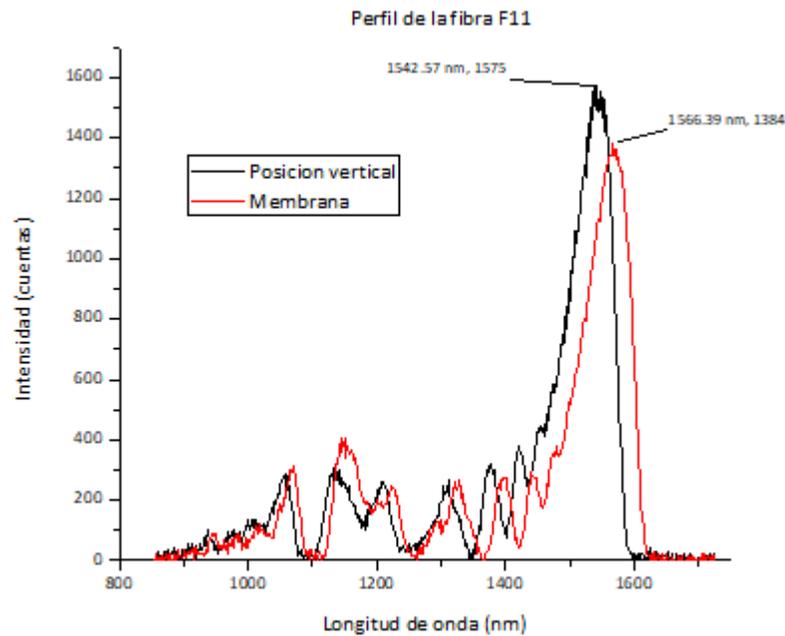
**Gráfica 3.10** Perfil de las fibras dentro de las diferentes membranas.



**Gráfica 3.11** Acercamiento de los perfiles a una longitud de onda de 1555 nm.

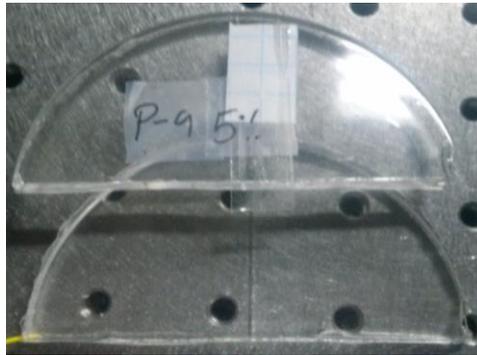
Después del proceso de vaciado del material y curado, se vuelven a tomar valores de cada una de las fibras, encontrando que, de las fibras colocadas en

los moldes, solo la fibra F11 funciona, es decir, obtenemos una señal con valores de intensidad, contrario a lo que pasa con las fibras restantes. La grafica siguiente (Gráfica 3.12) muestra los valores obtenidos de la fibra F11, cuando se encuentra en el molde en posición vertical sin haber vaciado el material y posteriormente cuando la fibra se encuentra dentro de la membrana.



**Gráfica 3.12** Valores de intensidad de la fibra F11.

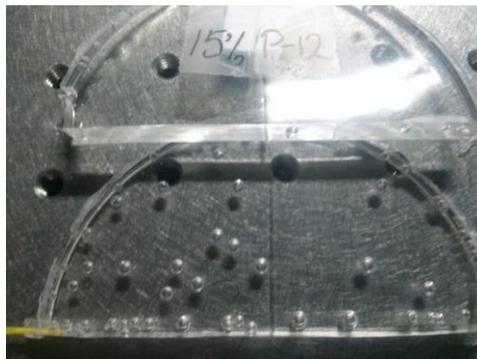
De nueva cuenta se realizan mediciones con las fibras restantes (F9, F10 y F12) con la finalidad de obtener valores de intensidad, modificando la punta de la fibra monomodo (cortándola) que se conecta al espectrómetro, limpiándola, cambiando adaptadores; todos los cambios llevan al mismo resultado: no existe señal alguna proveniente de las fibras. Con este resultado, se revisan las membranas las cuales no presentan ningún daño, por último, con ayuda de un microscopio se revisan las fibras encontrando fisuras o astillas en las fibras dentro de las membranas. Con esta información, las membranas son cortadas por la mitad para revisarlas más a detalle (Figura 3.15, Figura 3.16 y Figura 3.17).



**Figura 3.15** Membrana al 5% de catalizador.

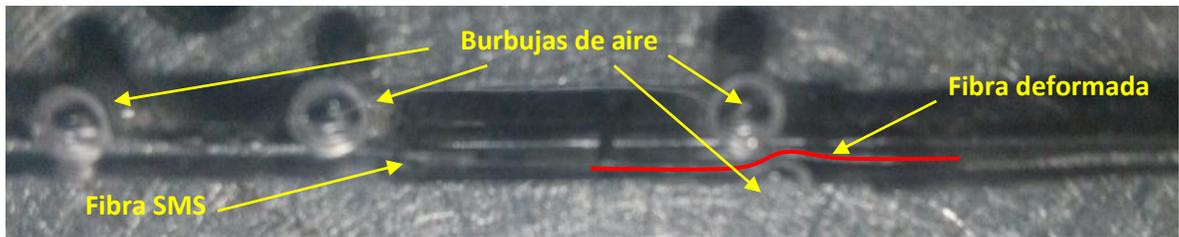


**Figura 3.16** Membrana al 20% de catalizador.



**Figura 3.17** Membrana al 15% de catalizador.

La siguiente figura (Figura 3.18) muestra la falla en la fibra F9, se presentan burbujas de aire en la unión de las fibras monomodo y multimodo provocando que la fibra se deforme.

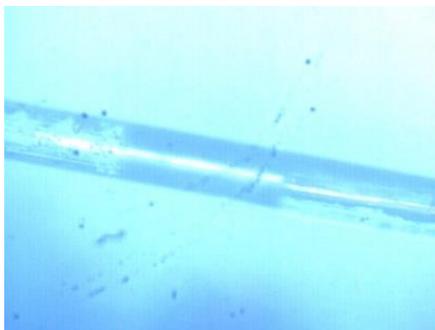


**Figura 3.18** Fibra F9, presenta burbuja de aire que deforma la fibra SMS.

La siguiente figura muestra la fibra F10 (Figura 3.19), en donde se hace un corte a lo largo de la fibra y se puede apreciar una flexión que no es ideal para el funcionamiento, también, después de inspeccionarla en el microscopio, se observan partes fracturadas (Figura 3.20 y Figura 3.21).



**Figura 3.19** Fibra F10 deformada por curvatura.



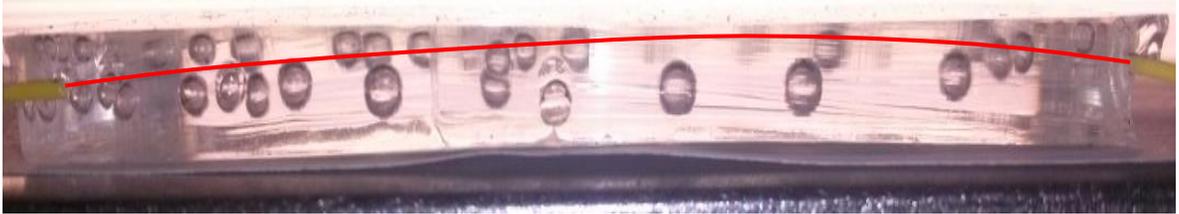
**Figura 3.20** Fibra astillada.



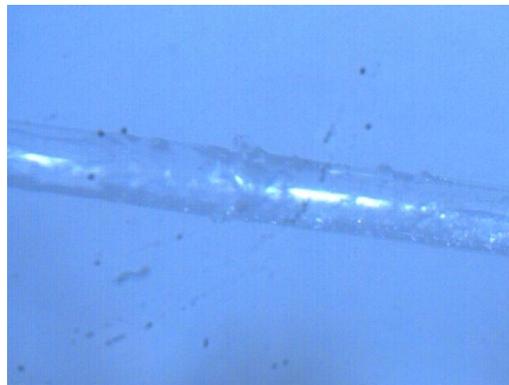
**Figura 3.21** Fibra SMS fracturada.

La siguiente figura (Figura 3.22) muestra la fibra F12, la cual también está flexionada, recordando que la posición ideal de la fibra es en línea recta, a pesar de esta flexión la fibra puede funcionar, revisándola en el microscopio

se observa que en un empalme las fibras se encuentran fracturadas (Figura 3.23).

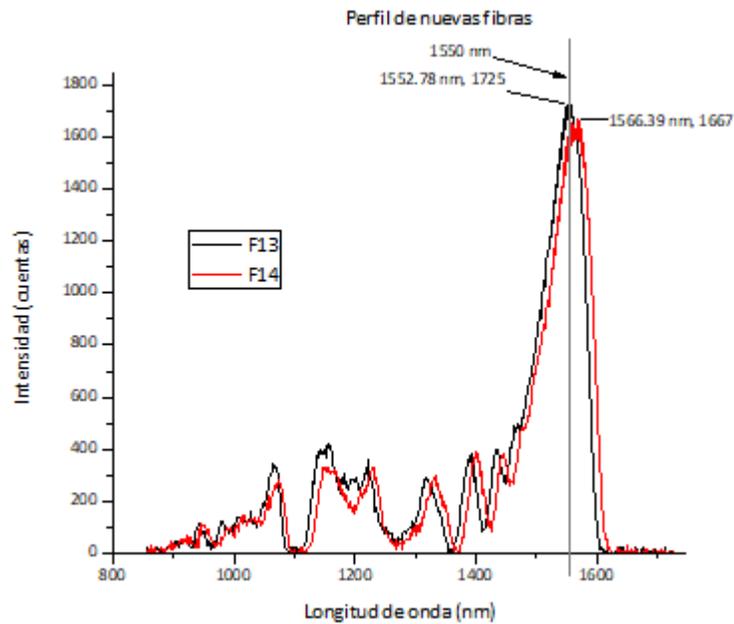


**Figura 3.22** Fibra flexionada dentro de la membrana.



**Figura 3.23** Fibra fracturada.

La pérdida de las tres membranas debido a la presencia de burbujas propicia la fabricación de nuevas fibras SMS y membranas de PDMS. En esta etapa se fabrican dos membranas (F13 y F14) con el mismo espesor que las anteriores, pero con diferente porcentaje de catalizador y la sección de la fibra multimodo continúa siendo de 13.75 mm. La siguiente grafica (Gráfica 3.13) muestra el perfil de cada una de las fibras, indicando el nivel de intensidad y la longitud de onda donde se encuentra.



**Gráfica 3.13** Perfil de las fibras F13 y F14.

A la fibra F13 se le añade una mezcla de PDMS con un porcentaje de catalizador del 15%; mientras que a la fibra F14 se le añade la mezcla de PDMS con un 8.86% de catalizador. En la tabla siguiente (Tabla 3.4) se muestran los valores en gramos de ambas mezclas.

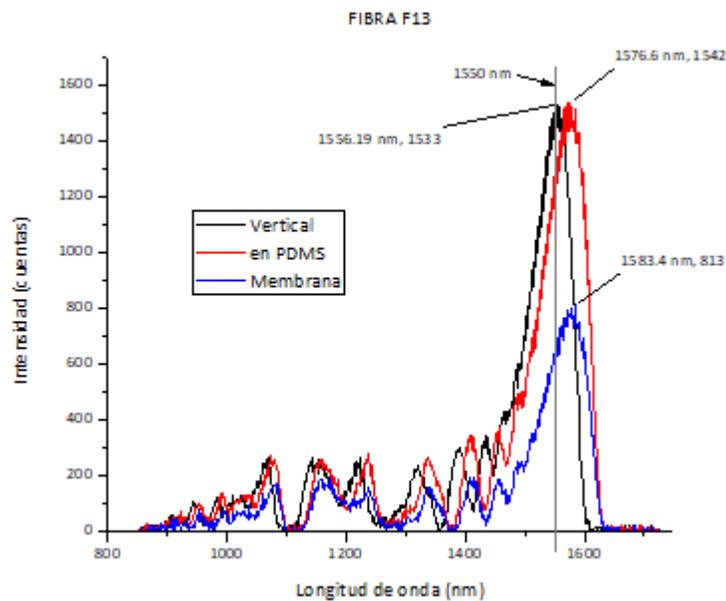
**Tabla 3.4** Características de las membranas.

Fibra	PDMS (gramos)	Catalizador		Total (gramos)
		(%)	(gramos)	
F13	45	15	6.75	51.75
F14	35	8.86	3.1	38.1

Durante el proceso de la fabricación de las membranas, las fibras se monitorean los valores de intensidad y longitud de onda en tres etapas, la primera es cuando la fibra se coloca dentro del molde y se coloca en posición vertical, la segunda etapa es cuando se agrega la mezcla de PDMS y

catalizador y, la tercera y última es cuando la membrana ya está curada y es retirada del molde.

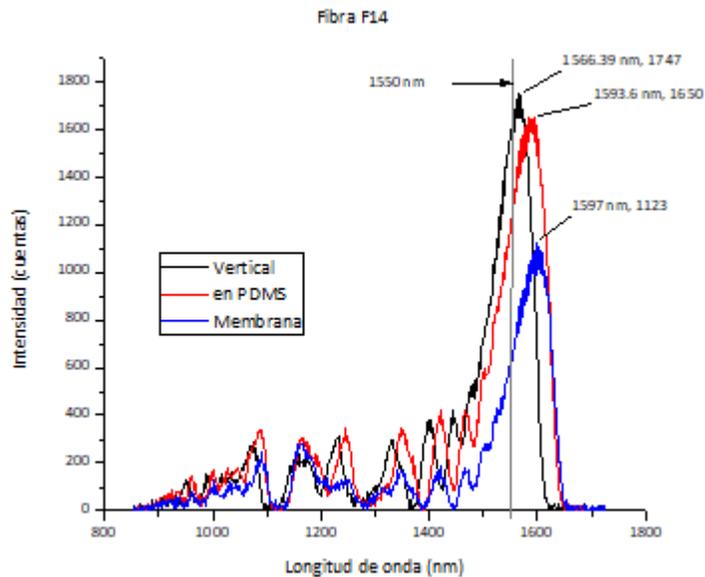
Para la fibra F13 (Gráfica 3.14) se observan los cambios en los valores de intensidad y longitud de onda, al colocar la membrana en posición vertical la longitud de onda donde se encuentra el valor máximo de intensidad pasa de 1552.78 nm y una intensidad de 1725 a un valor máximo de intensidad de 1533 a una longitud de onda de 1556.19; cuando el PDMS se agrega, el máximo valor de intensidad y longitud de onda aumentan a 1542 a 1576.6 nm respectivamente y terminado el proceso de curado de la membrana el valor de intensidad disminuye hasta 813 y la longitud de onda aumenta hasta llegar a 583.4 nm.



**Gráfica 3.14** Perfil de la fibra en diferentes posiciones.

Para la fibra F14 (Gráfica 3.15) se observa que solo la intensidad aumenta de 1667 a 1747 cuando pasa de la posición horizontal a la vertical, cuando se agrega el PDMS se observa que la longitud de onda aumenta mientras la

intensidad disminuye, colocándose en los valores de 1593.6 nm y 1650 respectivamente. Por último, ya retirada la membrana del molde los valores cambian nuevamente, ahora la longitud de onda aumenta a 1597 nm y la intensidad disminuye hasta alcanzar los 1123.



**Gráfica 3.15** Perfil de la fibra en diferentes posiciones.

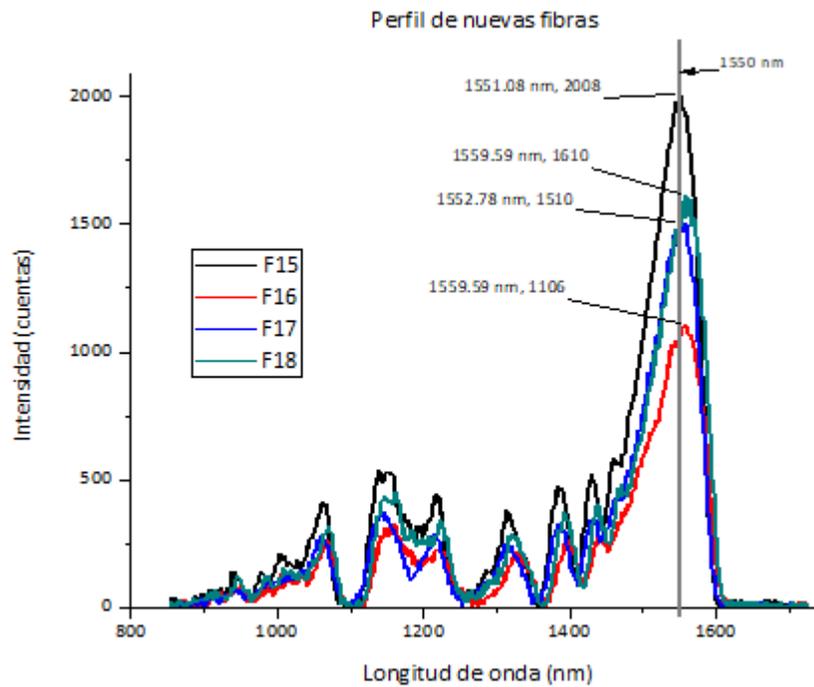
Posteriormente, durante el manejo de las nuevas membranas, la membrana con la fibra F13 sufre daños dejándola fuera de funcionamiento, en este punto de la investigación sólo se analizarán dos membranas, las que contienen a las fibras F11 y F14. Realizando una comparación entre los valores obtenidos antes de vaciar el PDMS y después que se ha secado en el caso de la fibra F11 la longitud de onda donde se presenta la máxima intensidad de cuentas se desplaza 41.82 nm y la diferencia de intensidad disminuye 191 cuentas; para la fibra F14 la longitud de onda donde se presenta la máxima intensidad de cuentas se desplaza 30.61 nm y desciende 624 cuentas.

Con los datos recabados, se procede a fabricar un segundo lote de membranas (Tabla 3.5), ahora con un molde de 2.5 mm de espesor con la finalidad de reducir el número de burbujas de aire y la curvatura en la fibra.

**Tabla 3.5** Segundo lote de membranas de PDMS.

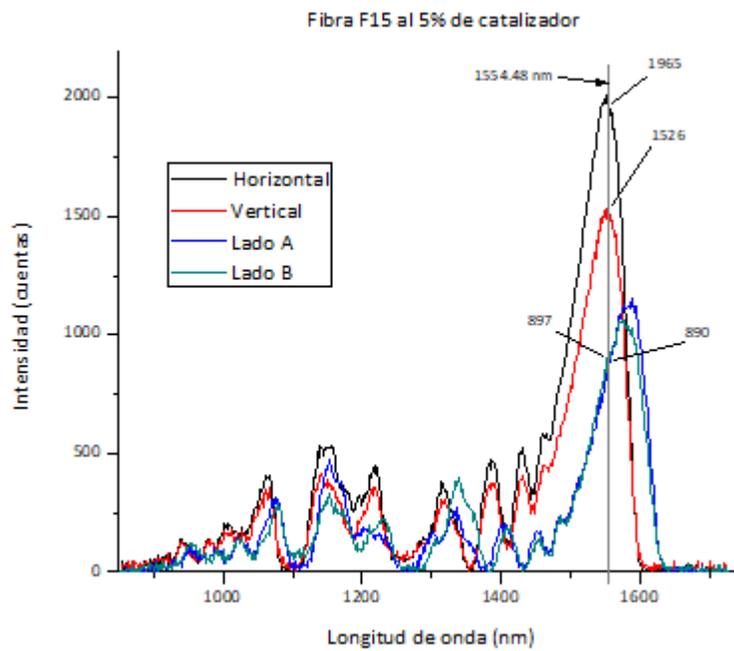
Fibra No.	Relación de catalizador	Porcentaje de catalizador	PDMS utilizado (gramos)	Catalizador utilizado (gramos)	Total (gramos)
15	10:0.5	5%	35	1.75	36.75
16	10:1	10%	35	3.5	38.5
17	10:1.5	15%	35	5.25	40.25
18	10:2	20%	35	7	42

La Gráfica 3.16 presenta los valores de la longitud de onda en donde se localiza el máximo valor de intensidad. La fabricación de las fibras se realiza para tener valores de comparación entre ellas y se utilizarán en todo el proceso del sensor.

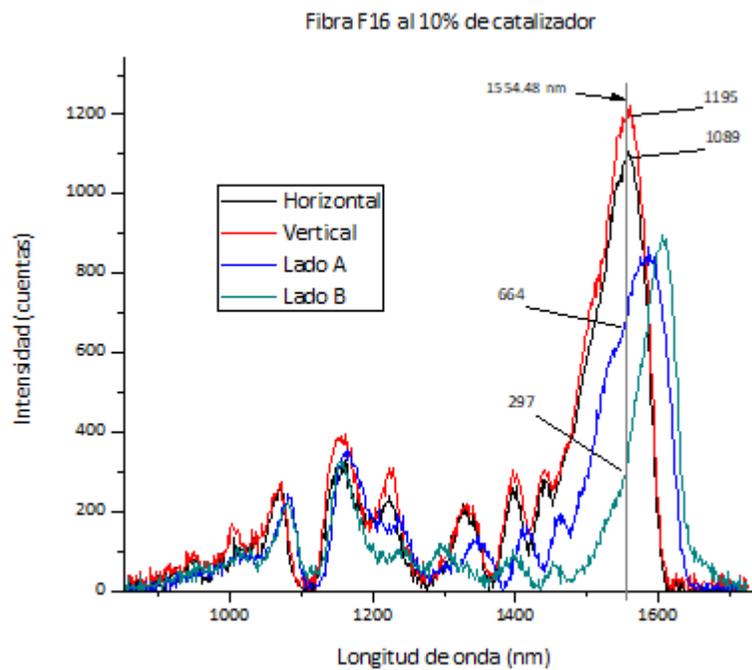


**Gráfica 3.16** Valores de intensidad de las nuevas fibras.

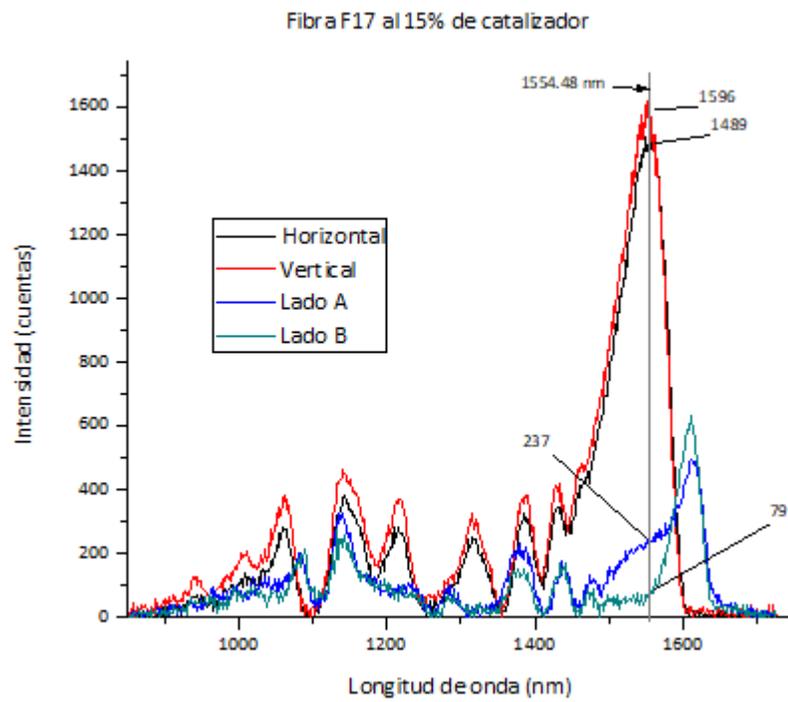
A continuación, se muestran las gráficas (Gráfica 3.17, Gráfica 3.18, Gráfica 3.19 y Gráfica 3.20) de intensidad de las fibras a una longitud de onda de 1554.48 nm correspondiente a las siguientes posiciones: horizontal, vertical, lado A y lado B.



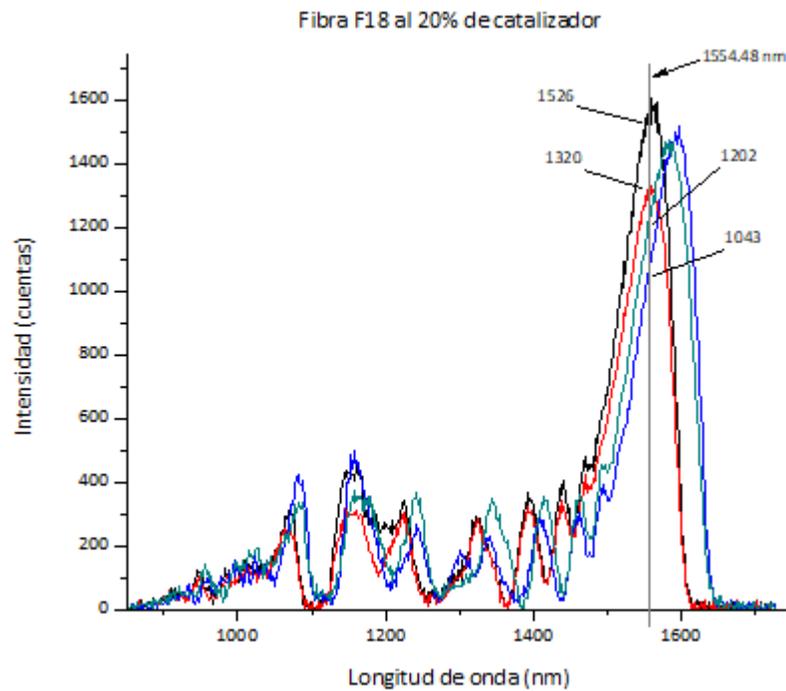
**Gráfica 3.17** Perfiles de la fibra F15.



**Gráfica 3.18** Perfiles de la fibra F16.



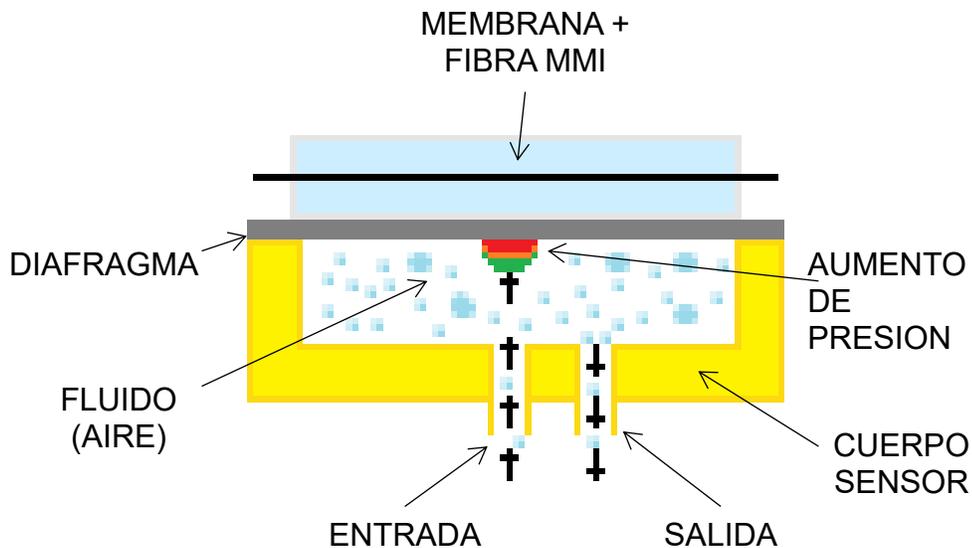
Gráfica 3.19 Perfiles de la fibra F17.



Gráfica 3.20 Perfiles de la fibra F18.

### 3.4 FABRICACION DEL CUERPO DEL SENSOR

Una vez caracterizado el perfil de cada una de las fibras en sus diferentes posiciones y procesos, se procede a la etapa de la fabricación del molde, el arreglo propuesto para la medición de presión utilizando las membranas con las fibras SMS se muestra en la Figura 3.24. El principio de funcionamiento del sensor se basa en un diafragma el cual se encuentra debajo de la membrana con la fibra SMS, al aplicar presión éste se deformará provocando cambios de señal en la intensidad de la fibra.



**Figura 3.24** Arreglo propuesto para la medición de presión.

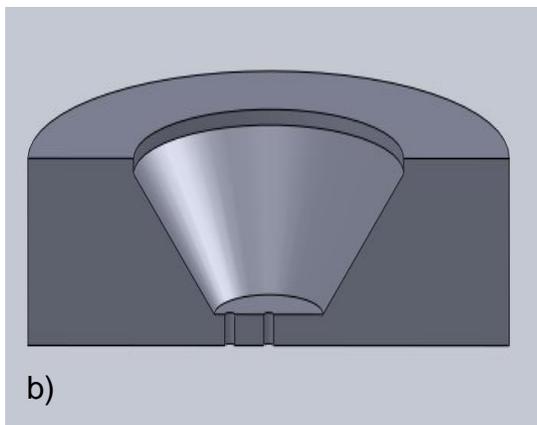
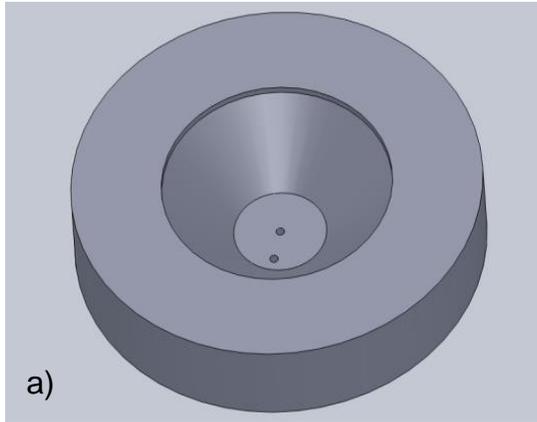
Una vez determinada la forma de operación del sensor, es turno de conocer cómo se comportará el diafragma al aplicar presión y esta a su vez, como afectará a la fibra SMS dentro de la membrana. Antes de seleccionar el cuerpo del sensor, se proponen cuatro geometrías diferentes para encontrar la mejor distribución de la presión en el diafragma. El software utilizado es ANSYS 12.1, el mallado de las geometrías se realizó en ICEM CFD y las simulaciones se llevaron a cabo en CFX.

Las condiciones de operación son las siguientes: el fluido es aire a 25° C, en el dominio del modelo la presión de referencia es de 1 atm, la transferencia de calor es isotérmica; en el modelo de turbulencia se maneja k – epsilon y la función de pared es escalable.

Las condiciones de frontera establecidas son las siguientes:

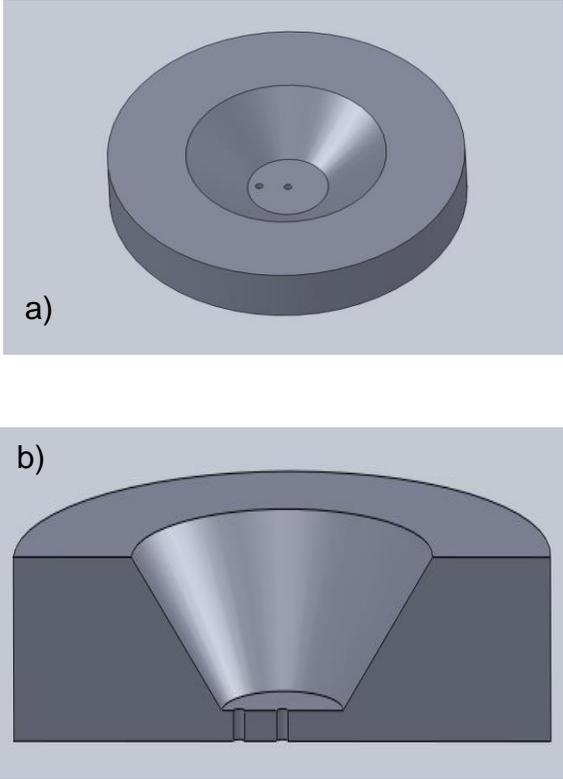
- Pared: se indican las paredes del molde sin rugosidad y sin deslizamiento;
- Entrada: se indica la entrada del fluido a una presión estable de 7 bar con una turbulencia del 5% y la dirección del flujo normal a la condición de frontera en estado estacionario; para estado transitorio una presión estática de 7 bar con una dirección de flujo y turbulencia de gradiente cero; y
- Salida del fluido: se indica como una frontera de tipo opening y con una presión relativa de 0 bar en estado estacionario, para estado estacionario se indica como outlet y una velocidad normal de 125.91 m/s.

La primera geometría es un molde con interior cónico en donde se incluye un escalón (Figura 3.25).



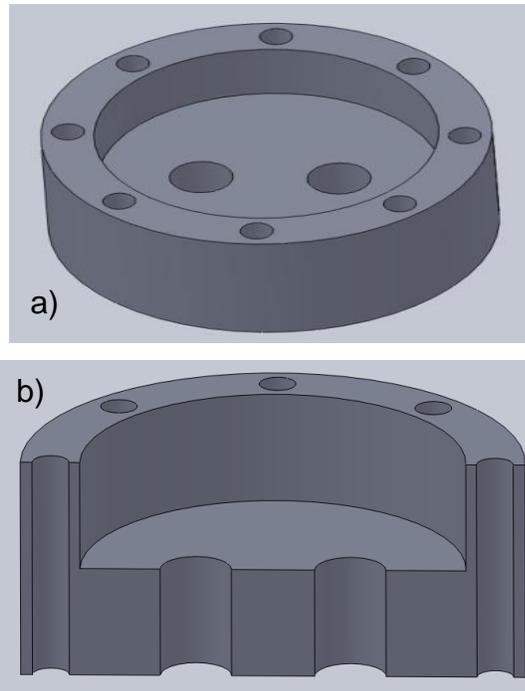
**Figura 3.25** a) Vista del molde completo, b) Sección transversal.

La segunda geometría propuesta en un molde cónico sin escalón (Figura 3.26).



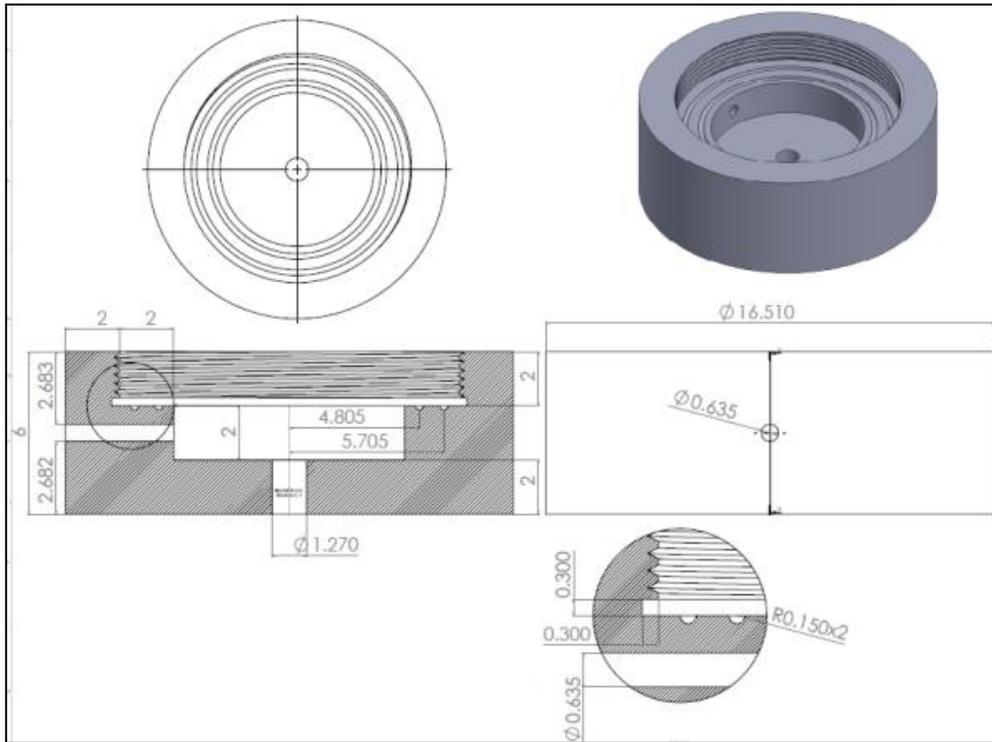
**Figura 3.26** a) Vista del molde completo, b) Sección transversal.

La tercera geometría se basa en un molde existente de interior cilíndrico (Figura 3.27).

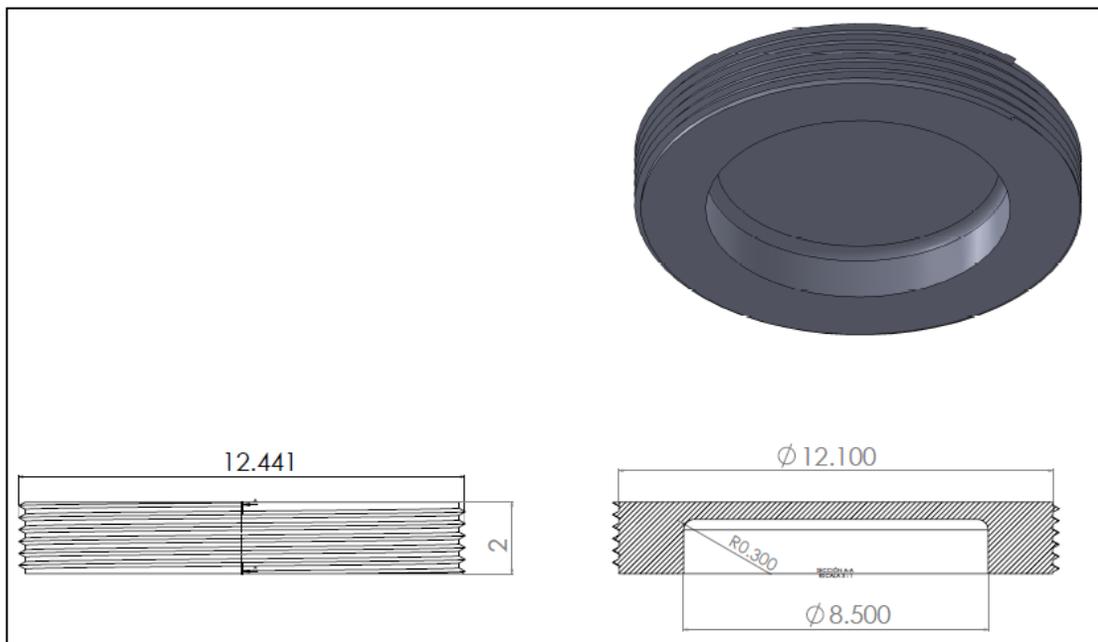


**Figura 3.27** a) Vista del molde completo, b) Sección transversal.

La última geometría propuesta es un molde de interior cilíndrico, de altura menor al molde de aluminio y el material propuesto es Nylamid M debido a sus características en cuanto a un fácil maquinado, de bajo peso y resistencia. (Figura 3.28). También, se fabricará la tapa del molde, se propone fabricar dos las cuales serán de 3 mm y 5 mm de espesor y del mismo material (Figura 3.29).



**Figura 3.28** Diseño del molde (cuerpo del sensor).

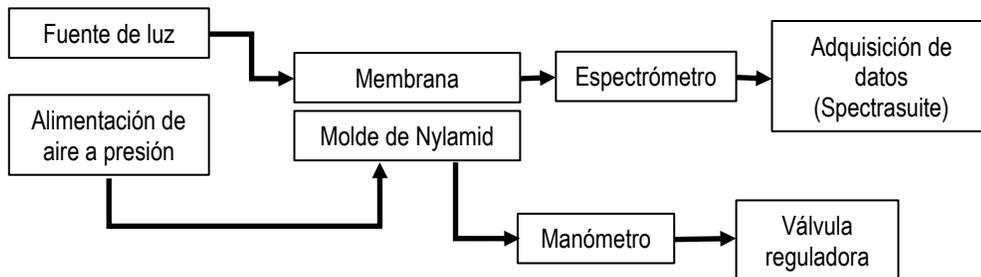


**Figura 3.29** Diseño de la tapa del molde (diafragma).

### 3.5 ARREGLOS EXPERIMENTALES PARA LA MEDICION DE INTENSIDAD DE LA FIBRA CON EL MOLDE PROPUESTO

#### 3.5.1 VALORES DE INTENSIDAD (CUENTAS)

Una vez fabricado el molde con sus tapas y teniendo las fibras listas, el siguiente paso es armar un sistema para la medición de la intensidad de la fibra al aplicarle presión. El arreglo propuesto (Diagrama 3.1) consta de una alimentación de aire a presión, la cual pasa por un manómetro que indica la presión que está entrando al molde, y a la salida del molde una válvula reguladora para ajustar la presión del sistema. Por la parte de la membrana, se conecta una fuente de luz a la membrana de PDMS con la fibra y al otro extremo un espectrómetro, el cual, se conecta a una PC para la adquisición de datos mediante el programa Spectrasuite. El arreglo armado en el laboratorio se muestra en la Figura 3.30. Se realizan pruebas con las fibras (F15, F16, F17 y F18) dentro de las membranas por los dos lados y utilizando las dos tapas (3mm y 5 mm) para obtener valores de intensidad aplicando presión en un rango de 0 a 25 psi.



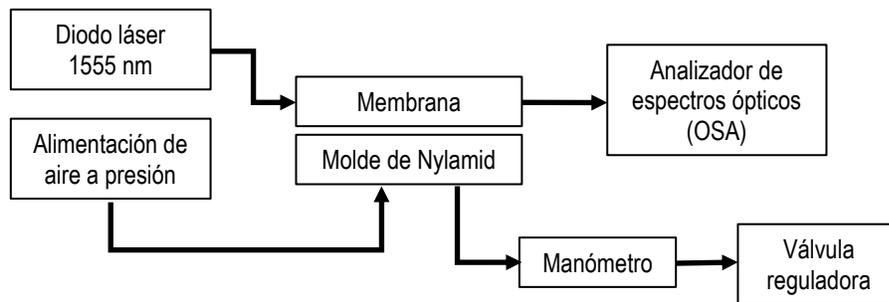
**Diagrama 3.1** Esquema del arreglo experimental propuesto para la adquisición de datos.



**Figura 3.30** Arreglo montado en el laboratorio.

### **3.5.2 VALORES DE POTENCIA**

El esquema del arreglo propuesto para la obtención de potencia que pasa a través de la fibra dentro de la membrana se muestra a continuación (Diagrama 3.2). La variante al esquema anterior (Diagrama 3.1) es el cambio de la fuente de luz a un diodo láser de 1555 nm y la parte final, el espectrómetro y el software se cambia a un analizador de espectros óptico (OSA). El arreglo montado en el laboratorio se muestra en la Figura 3.31.



**Diagrama 3.2** Esquema del arreglo propuesto para la obtención de valores de potencia.



**Figura 3.31** Arreglo montado en el laboratorio.

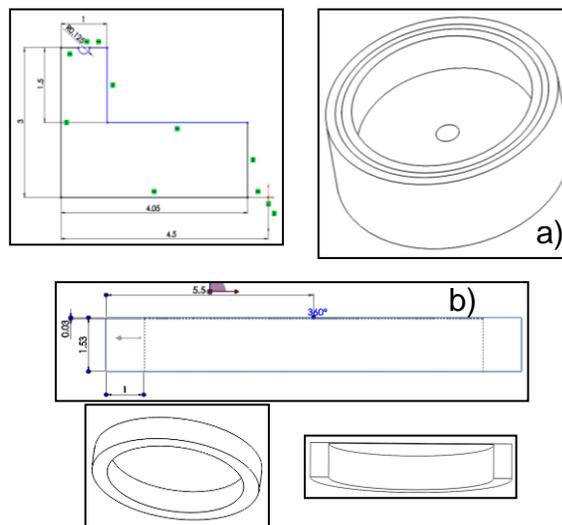
Se repiten las pruebas, con cada una de las fibras dentro de las membranas por los dos lados y con las tapas de 3 mm y 5 mm de espesor.

### 3.5.3 VALORES DE POTENCIA EN MOLDE INOX (0 – 3 MPa)

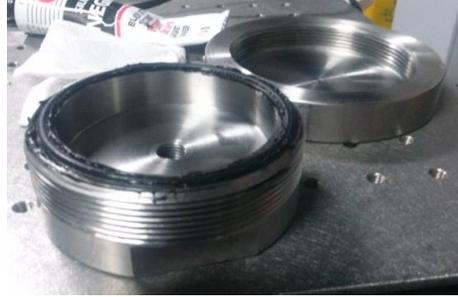
Es necesario aumentar la presión dentro del molde para la continuación de las pruebas y comprobar el funcionamiento del sensor. Se presenta un inconveniente con el molde de Nylamid ya que presenta fugas entre la tapa y el cuerpo. Al sobrepasar los 30 psi comienza a perder presión y los problemas

para poder contenerla y controlarla aumentan llegando al punto de explotar las tapas.

La idea de cambiar de material se presenta, buscando otra opción que se adecúe a las necesidades de operación se opta por fabricar el mismo modelo ahora en acero inoxidable, se modifica el cuerpo del molde original para colocar un empaque entre la tapa y el cuerpo para aumentar la hermeticidad (Figura 3.32). La Figura 3.33 presenta los moldes ya fabricados en acero inoxidable.



**Figura 3.32** a) Cuerpo del molde, se agrega un canal en el borde superior para colocar un empaque, b) Dibujo de la tapa del molde.



**Figura 3.33** Molde de acero inoxidable (INOX).

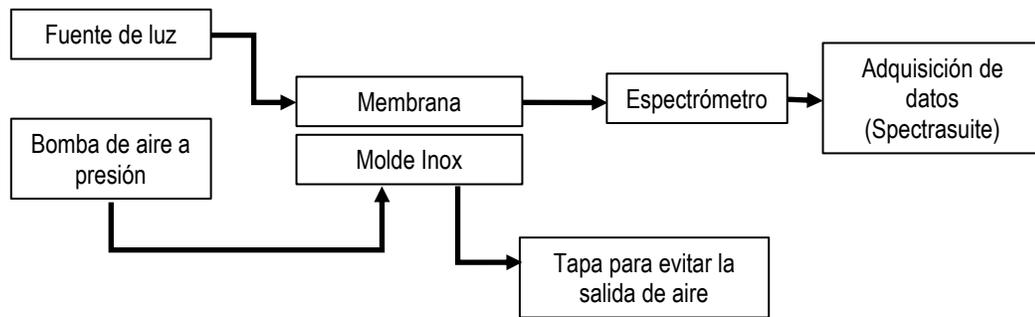
El aire a presión se obtiene de una bomba de presión manual (ver Apéndice), antes de comenzar las pruebas se verifica que no exista fuga de aire en el molde, para esto se conecta una manguera de la bomba de aire al molde y éste último se introduce a un recipiente con agua, la presión aumenta de 0 hasta alcanzar los 3 MPa de presión (Figura 3.34).



**Figura 3.34** Prueba de fugas.

Cerciorados que no existe fuga de aire en el molde, se continúa con las pruebas con las membranas para obtener su perfil de funcionamiento, ahora hasta 3 MPa.

El arreglo utilizado para las pruebas donde se caracteriza la intensidad de la fibra dentro de la membrana se muestra a continuación (Diagrama 3.3). El arreglo se presenta en la Figura 3.35 una vez ya instalado en el laboratorio.

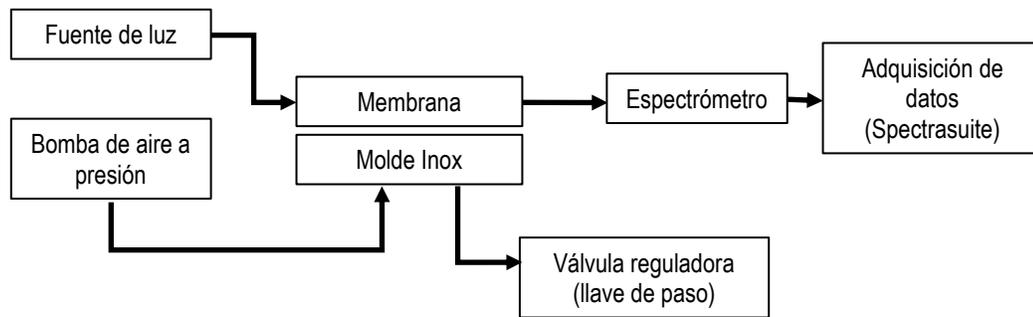


**Diagrama 3.3** Esquema del arreglo propuesto para trabajar con el molde INOX.



**Figura 3.35** Arreglo experimental montado en el laboratorio.

El arreglo para la medición de potencia para el molde INOX se presenta a continuación (Diagrama 3.4). La variante para este arreglo la salida, en la cual se coloca la válvula reguladora que servirá para llenar o vaciar el interior del molde (llave de paso).

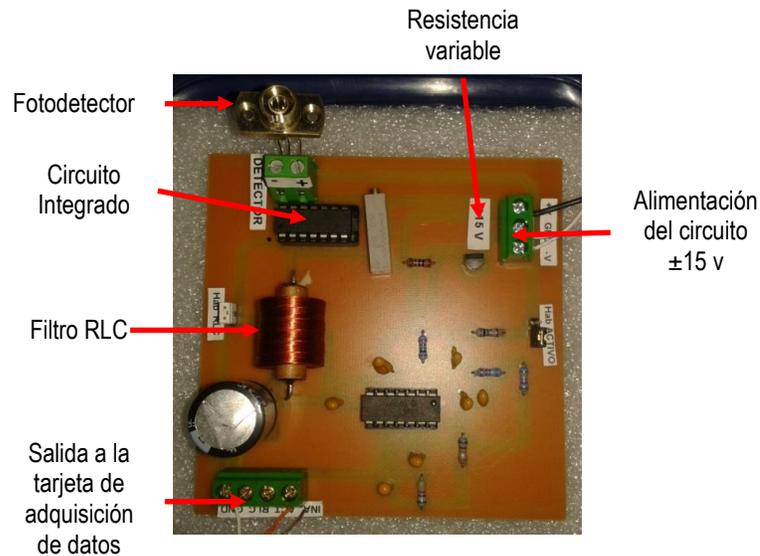


**Diagrama 3.4** Esquema del arreglo propuesto para la medición de potencia.

### 3.5.4 ADQUISICIÓN DE DATOS (VALORES DE VOLTAJE)

En la etapa de adquisición de la señal a través de una interfaz, se necesita transformar la señal del fotodetector a voltaje. Se utilizó un circuito amplificador para dicho fin (ver Apéndice). La potencia óptica que proviene de la fibra SMS llega al fotodetector y éste la convierte a corriente. La corriente entra al circuito integrado y es convertida en voltaje y para finalizar pasa a través de un filtro para eliminar el ruido en la señal (RLC).

El circuito amplificador (Figura 3.36) está constituido por tres elementos: filtro (RLC), activa y de instrumentación. En la parte de instrumentación se puede variar el factor de amplificación de la señal que proviene del fotodetector. El circuito amplificador necesita de una alimentación doble de  $\pm 15$  v, es importante la utilización de este circuito proporcionando una salida de voltaje estable a una tarjeta de adquisición de datos.



**Figura 3.36** Circuito amplificador.

Para la parte activa, el filtro tiene una configuración pasa – bajas de orden 5 de ganancia (grado de aceptación o rechazo de frecuencias por arriba o debajo de la frecuencia de corte) y una frecuencia de corte de 10 Hz esto es con el objetivo de eliminar frecuencias no deseadas en la señal de voltaje superiores a los 10 Hz.

En lo referente al circuito RLC, se utiliza con señales de baja amplitud y se requiere eliminar señales de ruido. El filtro pasivo utiliza componentes que no requieren alimentación externa, así se pueden conectar en serie la resistencia, la inductancia y el capacitor que debe estar aterrizado a la masa del circuito. La señal de salida del voltaje de este circuito se encuentra entre la bobina y el capacitor, dicho voltaje se leerá con una tarjeta de adquisición de datos.

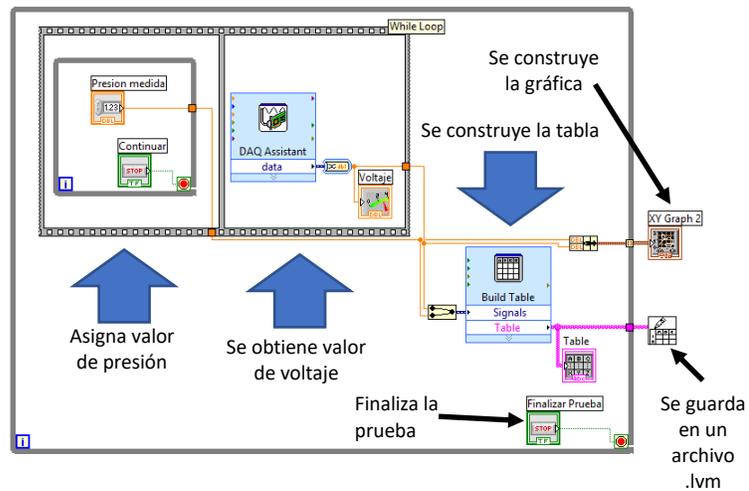
Para la parte de la adquisición de voltaje proveniente del circuito amplificador se utilizará una tarjeta USB – 6009 National Instrument (Figura 3.37).



**Figura 3.37** Tarjeta para la adquisición de datos.

Las características principales de la tarjeta USB – 6009 son las siguientes: 8 entradas analógicas, 2 salidas analógicas y energizado por bus para una mayor movilidad con 12 bits de resolución, conectividad de señal integrada (ver Apéndice).

Para obtener valores de voltaje por parte de la fibra óptica, se necesita establecer una interfaz entre el sensor y la PC, se recurre a LabView para hacerlo. En la siguiente figura (Figura 3.38) se muestra el diagrama de bloques del programa en LAbView. La primera etapa en asignar manualmente un valor para la presión, al continuar el programa obtiene el valor del voltaje, crea una tabla de los valores que uno requiera hasta que la prueba se detenga. Posteriormente crea una gráfica y guarda los datos en un archivo para poder obtener las gráficas que se necesiten.



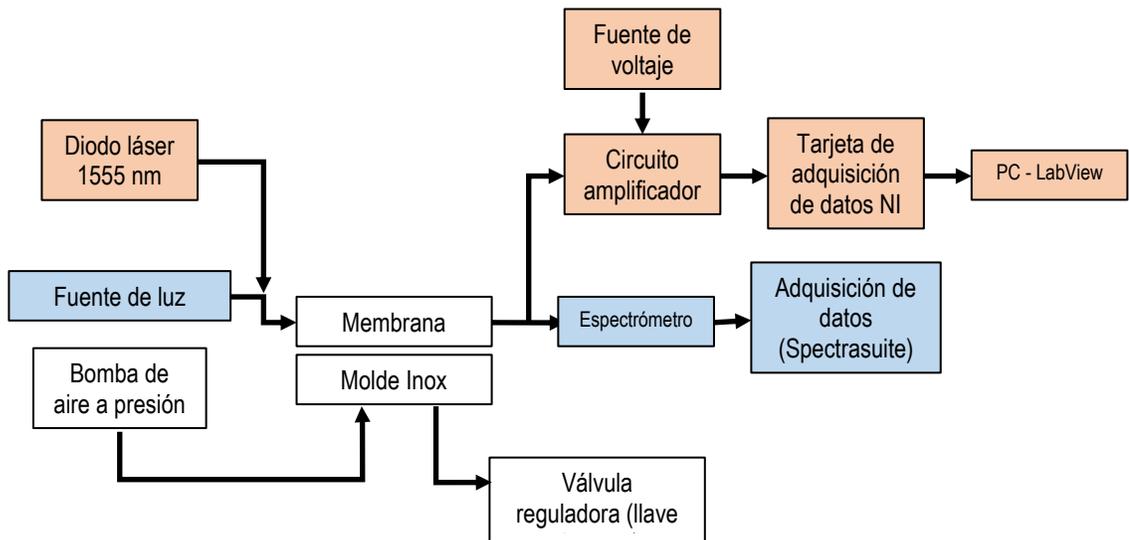
**Figura 3.38** Diagrama de bloques del programa de adquisición de voltaje en función de la presión.

El panel frontal del programa propuesto se presenta a continuación (Figura 3.39).



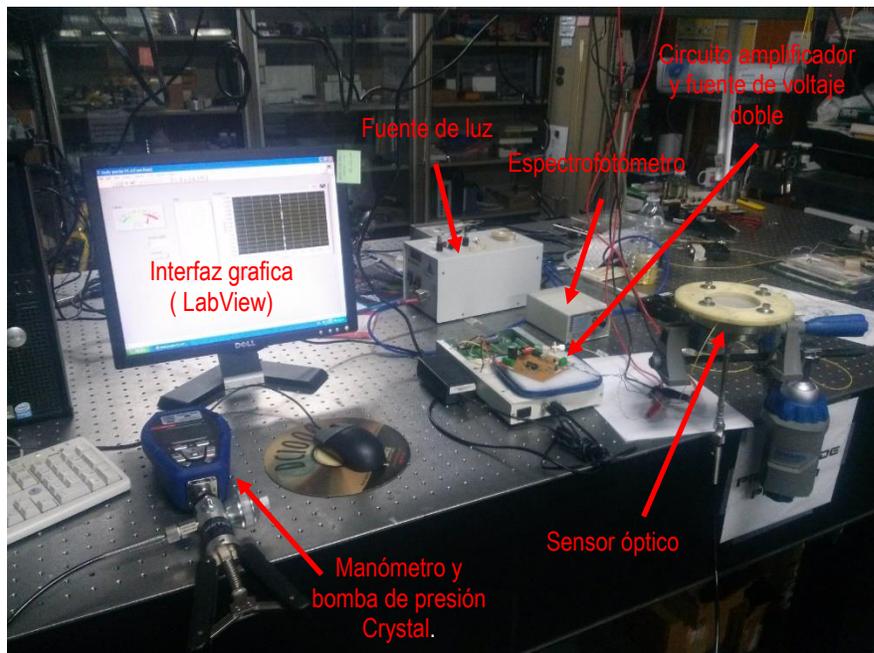
**Figura 3.39** Panel frontal del programa de obtención del voltaje.

El siguiente paso es la propuesta de un arreglo en el cual, se pueda intercambiar elementos para las diferentes pruebas tanto de intensidad como de voltaje. El siguiente esquema (Diagrama 3.5) muestra el arreglo propuesto.



**Diagrama 3.5** Arreglo experimental propuesto.

De la figura anterior se puede observar que existen elementos en dos colores, los cuales solo pueden estar conectados entre los mismos colores dependiendo los valores que se quieran obtener en las pruebas. Si todos los elementos de azul están conectados, los valores obtenidos serán de intensidad y si los de color naranja están conectados, los valores que se obtendrán serán de voltaje. El arreglo ya montado se presenta a continuación (Figura 3.40).

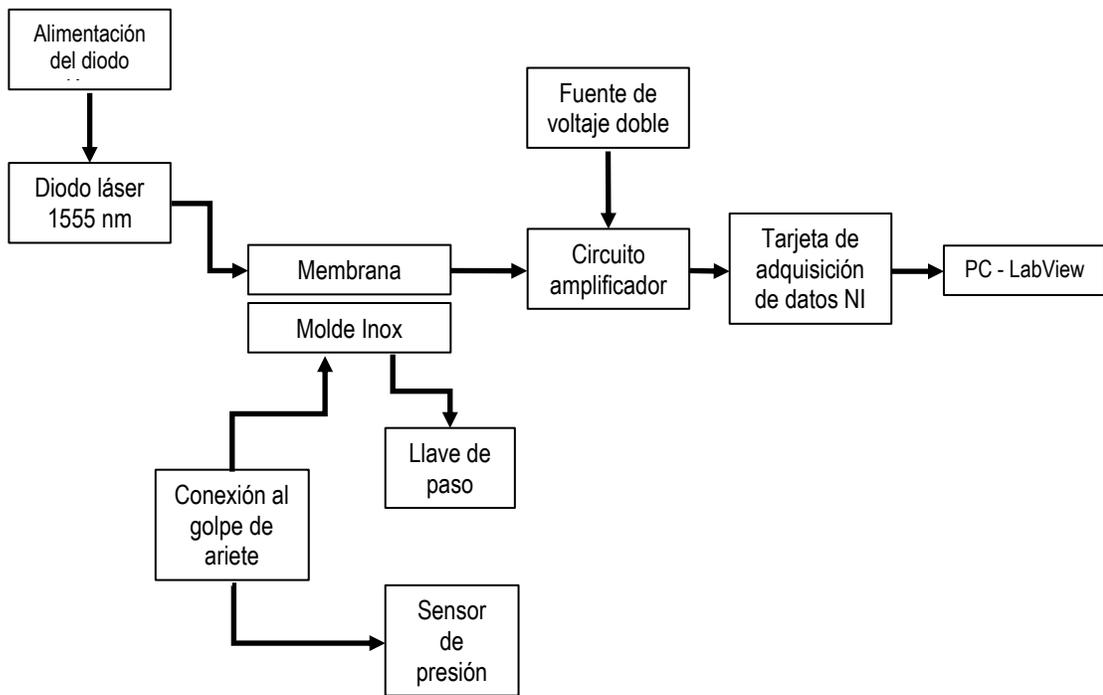


**Figura 3.40** Arreglo experimental armado en el laboratorio.

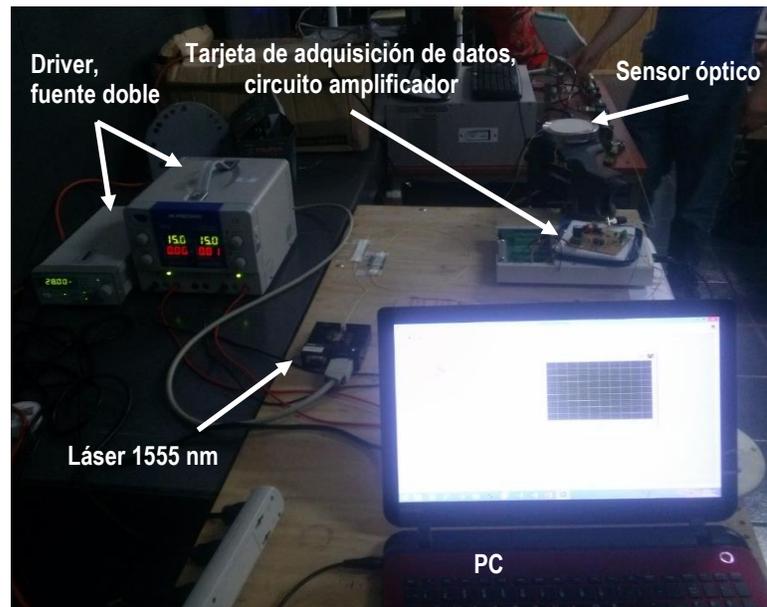
### 3.6 GOLPE DE ARIETE

Antes de conectar cualquier sistema eléctrico en el sensor, el molde se conecta al golpe de ariete y se coloca dentro de un recipiente de plástico resistente para asegurarse que no existirá ningún inconveniente (explosión) al estar trabajando con rangos de presión elevados (3 MPa) y que no haya fuga.

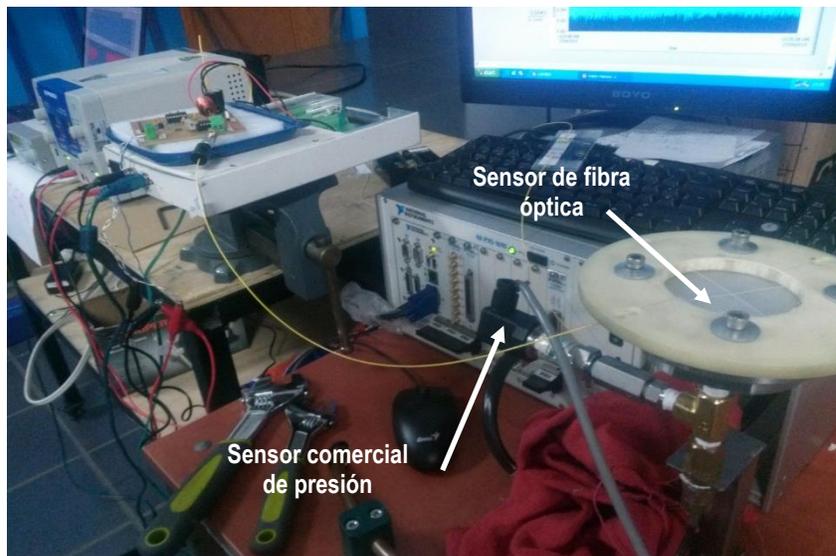
Para la realización de las pruebas en el golpe de ariete se propone un arreglo en el cual, de una conexión existe en el sistema del golpe de ariete se conecte una derivación en T para conectar al mismo tiempo el sensor de fibra óptica y un sensor comercial, éste último proporcionará las lecturas de presión dentro del sistema. El esquema del arreglo propuesto se presenta a continuación (Diagrama 3.6). El arreglo ya instalado en el golpe de ariete se muestra en la Figura 3.41.



**Diagrama 3.6** Esquema del arreglo propuesto para el golpe de ariete.



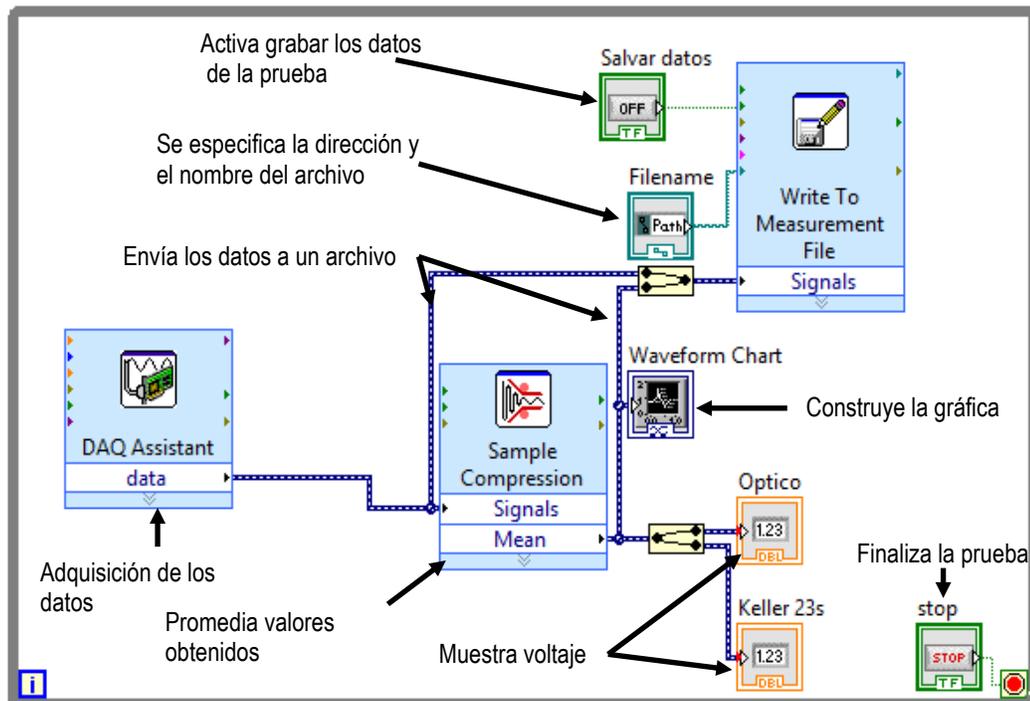
a)



b)

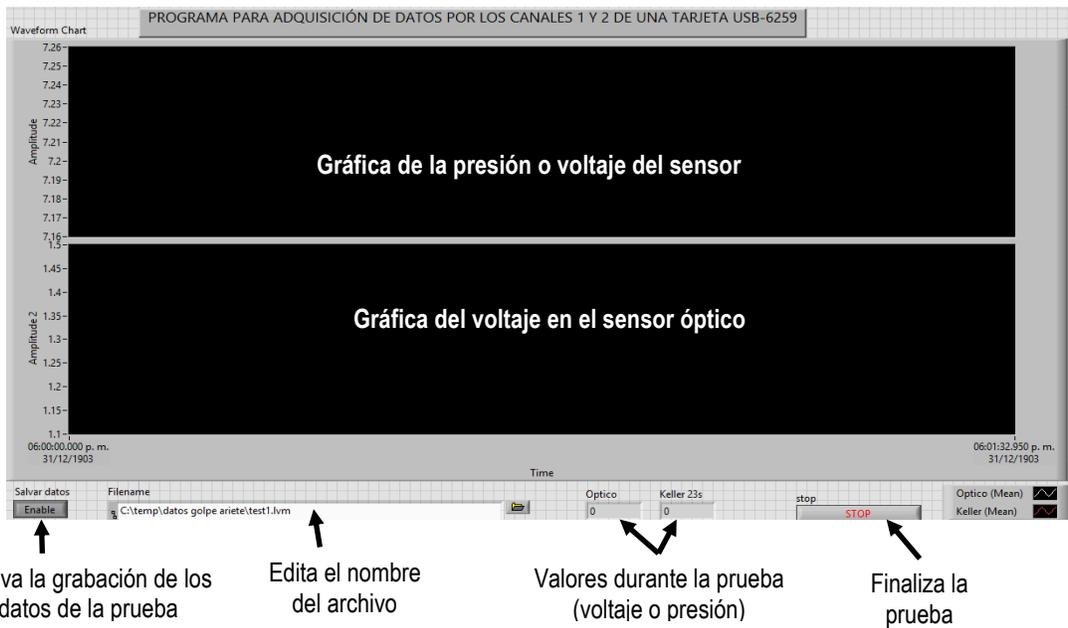
**Figura 3.41** a) Elementos del arreglo antes de instalarse en el golpe de ariete, b) Arreglo instalado en el golpe de ariete con los dos sensores conectados a la toma.

La adquisición de datos se continúa realizando con el circuito amplificador y la tarjeta de adquisición de datos, la diferencia a comparación de las pruebas anteriores es que para obtener los valores de presión y de voltaje el usuario captura un valor y presiona siguiente, y en el golpe de ariete no permite tener la posibilidad de detener la prueba cada vez que se requiera guardar un valor. Para esta prueba, se requiere de un nuevo programa que muestre los datos obtenidos en el transcurso de la prueba y los almacene para un posterior análisis. La siguiente figura muestra el programa utilizado construido en LabView (Figura 3.42).



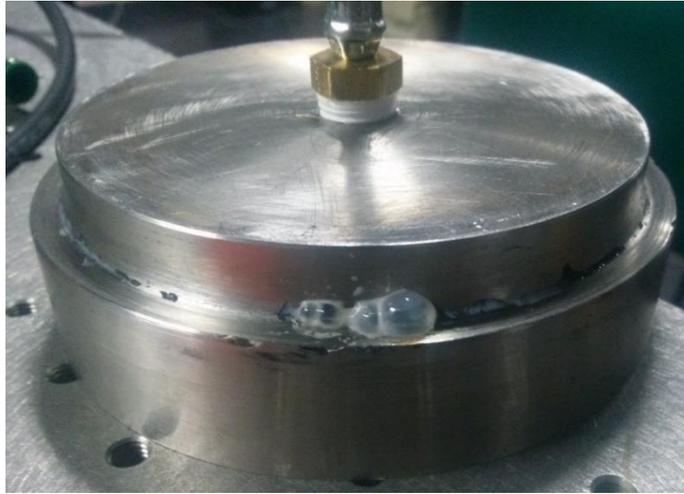
**Figura 3.42** Diagrama de bloques del programa para almacenar y mostrar los valores de voltaje y presión.

Se puede observar que se presentan dos valores, uno de voltaje que pertenece al sensor óptico y otro valor que pertenece a la presión que viene del sensor comercial que también estará instalado y con el cual se estará monitoreando la presión en el sistema para después la que nos servirá para relacionar con el voltaje en el sensor óptico. En la siguiente figura (Figura 3.43) se presenta el panel frontal del programa de adquisición de datos.



**Figura 3.43** Panel frontal del programa de adquisición de datos.

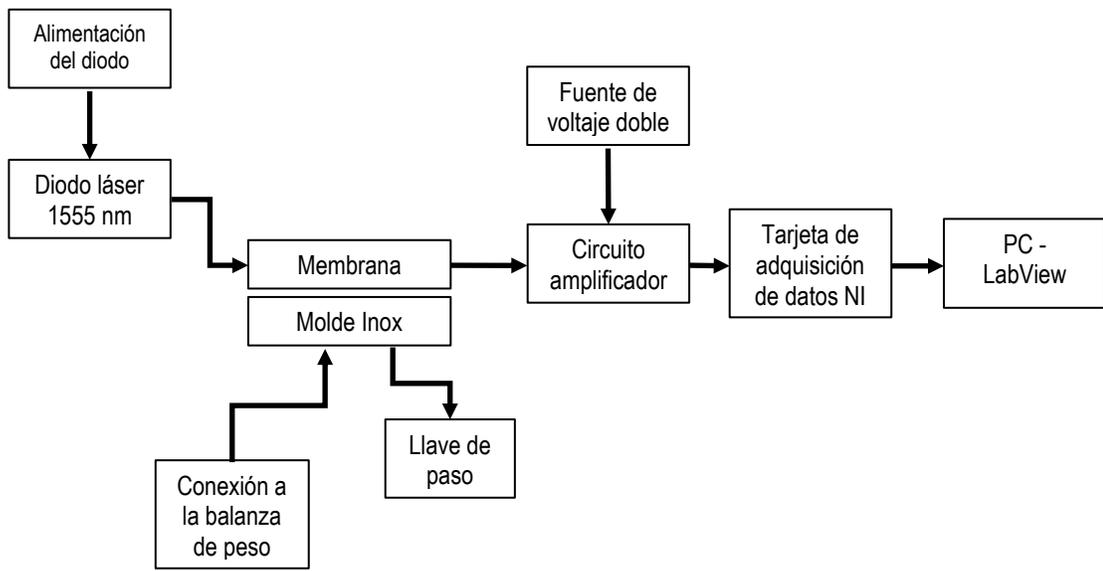
El molde propuesto para utilizarlo en el golpe presenta inconvenientes respecto a las lecturas, al parecer la tapa no es lo suficientemente delgada para detectar los cambios de presión de aproximadamente 1.5 MPa. Por tal motivo se rebaja la tapa a 1.5 mm de espesor y se presenta otro molde con la diferencia que está soldado, se pensaría que el molde soldado no presentaría fallas o fugas, pero las fugas se hacen presentes durante todo el proceso de pruebas y el molde nunca funcionó (Figura 3.44).



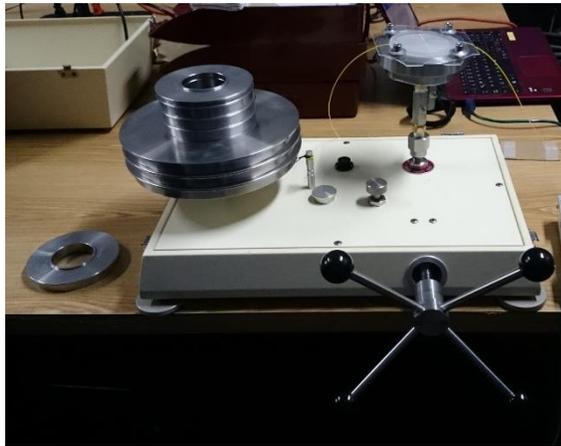
**Figura 3.44** Molde soldado presenta fugas.

### **3.7 CALIBRACION DEL SENSOR ÓPTICO**

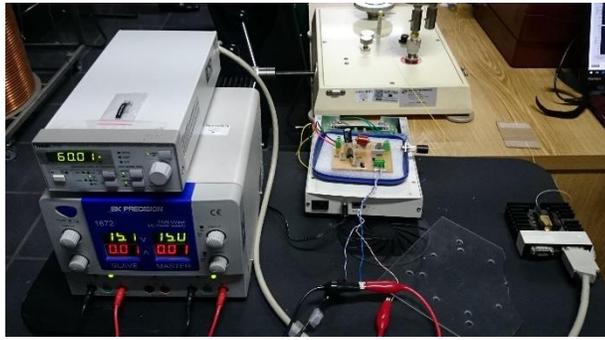
Asegurar el buen funcionamiento del sensor requiere de la calibración del mismo a diferentes presiones y observar su comportamiento en cuanto a valores de voltaje se refiere. Los valores de voltaje son importantes ya que con ellos se obtiene la presión dentro del sensor. Para la calibración se utiliza el arreglo anterior (Diagrama 3.6), cambiando el golpe de ariete por una balanza de peso muerto, la cual será la referencia de los valores de presión dentro del sensor y poder relacionar voltaje – presión. El diagrama se presenta a continuación (Diagrama 3.7), el arreglo montado para la realización de las pruebas de calibración se muestra en la Figura 3.45.



**Diagrama 3.7** Diagrama del arreglo propuesto para la calibración del sensor óptico.



a)



b)

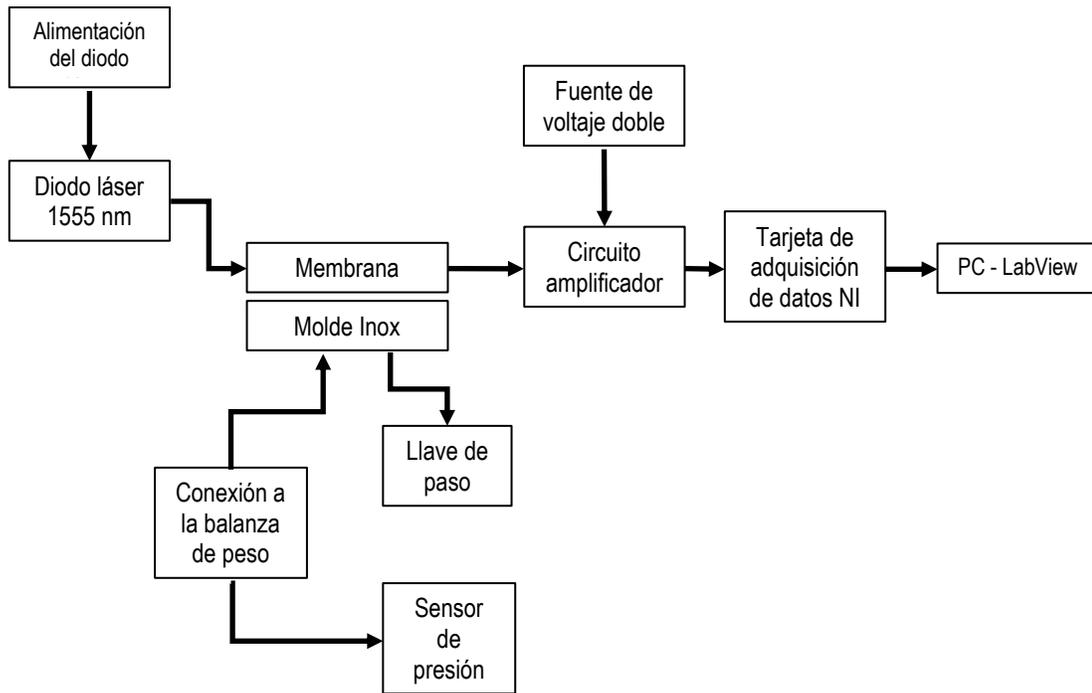


c)

**Figura 3.45** Arreglo para la calibración del sensor óptico, a) balanza de peso muerto y sensor óptico, b) circuito amplificador, alimentación del circuito y del diodo láser y tarjeta de adquisición de datos, c) adquisición de la señal utilizando Lab View.

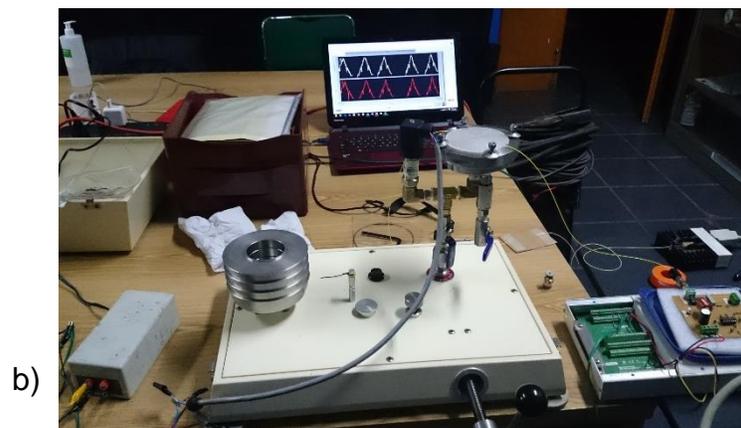
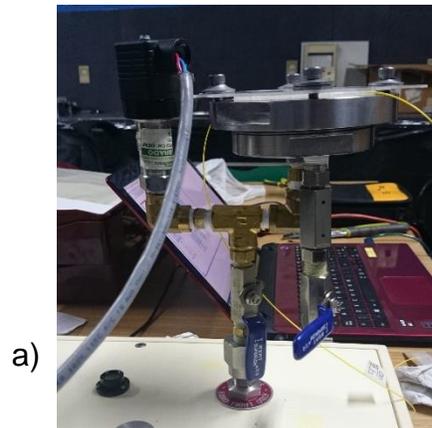
### **3.8 PRUEBAS DE COMPARACION EN BALANZA DE PESO MUERTO**

Una vez calibrado el sensor óptico, se compara de nueva cuenta con el sensor comercial, esta vez, en un sistema controlado en donde se tenga la certeza de los rangos de presión que se medirán. Ambos sensores se conectan a la balanza de peso muerto para poder comparar los valores de presión en rangos controlados, a continuación, se muestra el diagrama del arreglo propuesto para esta prueba (Diagrama 3.8).



**Diagrama 3.8** Arreglo propuesto para la comparación de valores entre los sensores comercial y óptico.

Con el arreglo propuesto en la figura anterior, se procede a instalarlo en el laboratorio (Figura 3.46).



**Figura 3.46** Arreglo montado en el laboratorio utilizando la balanza de peso muerto, a) sensor comercial y sensor óptico conectados a la balanza de peso muerto, b) pruebas de comparación entre los sensores.

La información presentada a lo largo de este capítulo contiene los diferentes arreglos y pruebas que se realizaron en el desarrollo de esta investigación, dichos resultados se presentarán y analizarán en el siguiente capítulo.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los procesos que se han realizado durante el desarrollo de esta investigación.

### 4.1 FABRICACIÓN DE MEMBRANAS

Terminado el proceso de elaboración de membranas, el primer lote comprende seis membranas con diferentes características entre sí (Tabla 4.1).

**Tabla 4.1** Membranas fabricadas, de las cuales, las que contienen a las fibras F11 y F14 son las membranas que se utilizarán.

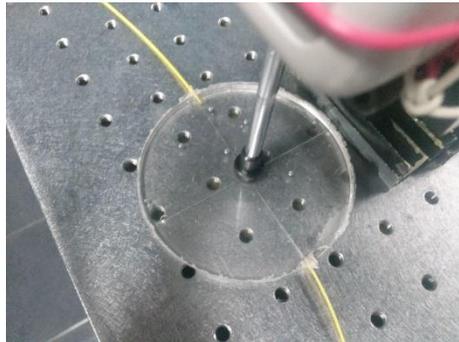
Fibra No.	Relación de catalizador	Porcentaje de catalizador	PDMS utilizado (gramos)	Catalizador utilizado (gramos)	Total (gramos)
9	10:0.5	5%	35	1.75	36.75
10	10:2	20%	35	7	42
11	10:0.75	7.5%	37.15	2.786	39.936
12	10:1.5	15%	35	5.25	40.25
13	10:1.5	15%	45	6.75	51.75
14	10:0.886	8.86%	35	3.1	38.1

La finalidad de cambiar las características entre cada una de las membranas es la de conocer su reacción a los cambios de presión, de las cuales, de acuerdo a la tabla, las fibras sombreadas son las que no sufrieron daños durante su caracterización debido a su elasticidad (Tema 3.3) y serán las utilizadas en las próximas pruebas.

## 4.2 APLICACIÓN DE PESO A LAS MEMBRANAS

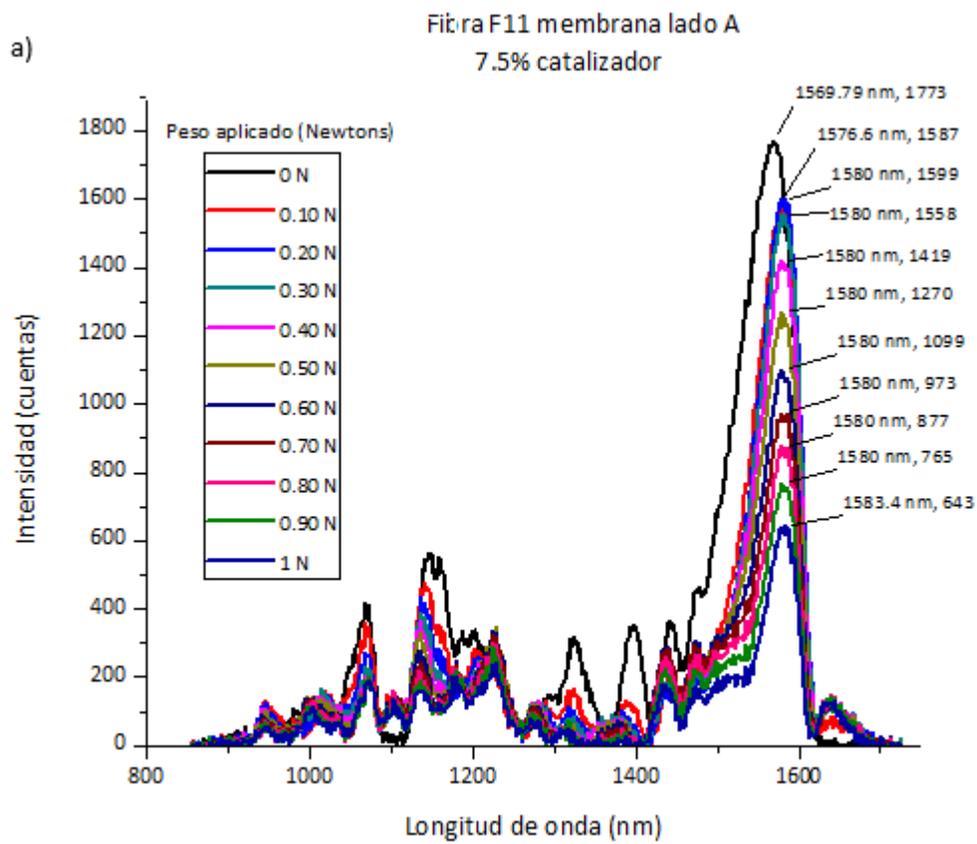
Con la finalidad de conocer el comportamiento de la señal de la fibra dentro de la membrana y antes de deformarla, se le aplica peso para comenzar a caracterizar las fibras que se utilizarán.

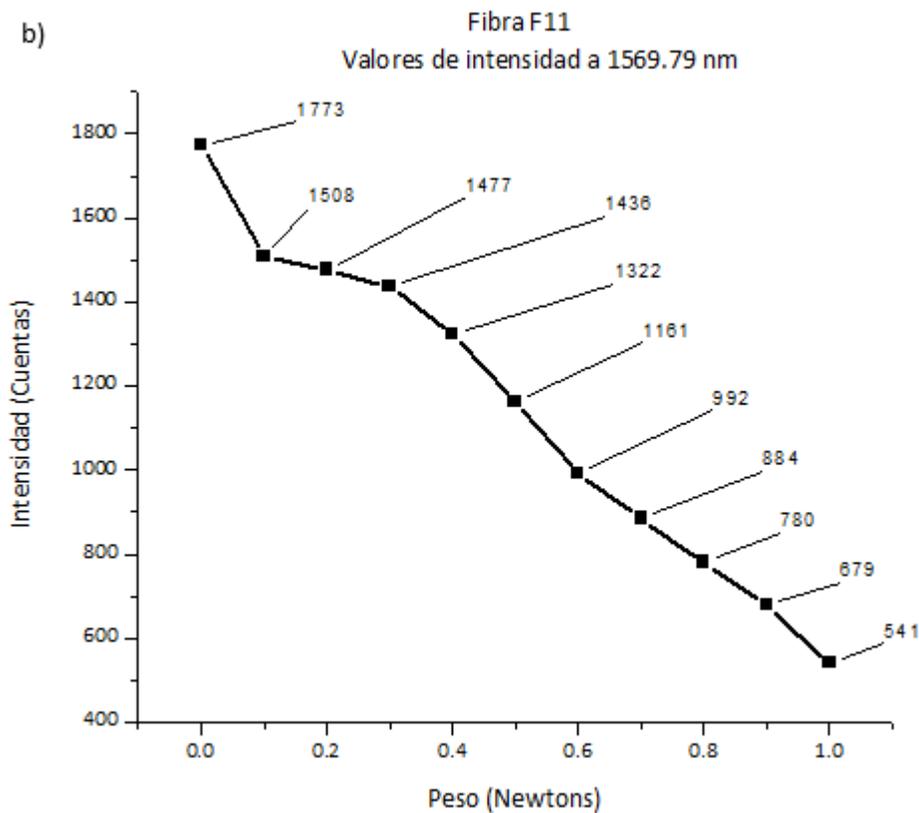
Utilizando la base para taladro utilizada en la fabricación de moldes, se acopla un dinamómetro el cual ejercerá fuerza sobre las membranas que se colocarán en la parte de la base. El dinamómetro bajará y a su vez aplicará fuerza sobre la membrana. Los lados de la membrana (A y B) se identificarán de la siguiente manera: el lado A es el lado liso de la membrana y el lado B se identifica debido a que, por defecto, el molde tiene una cruz en la base (Figura 4.1), por lo tanto, ese lado contará con unos bordes que atraviesan a la membrana formando una cruz.



**Figura 4.1** Se puede apreciar la cruz formada por los bordes del molde. Cuando la “cruz” esta sobre la superficie será el lado B.

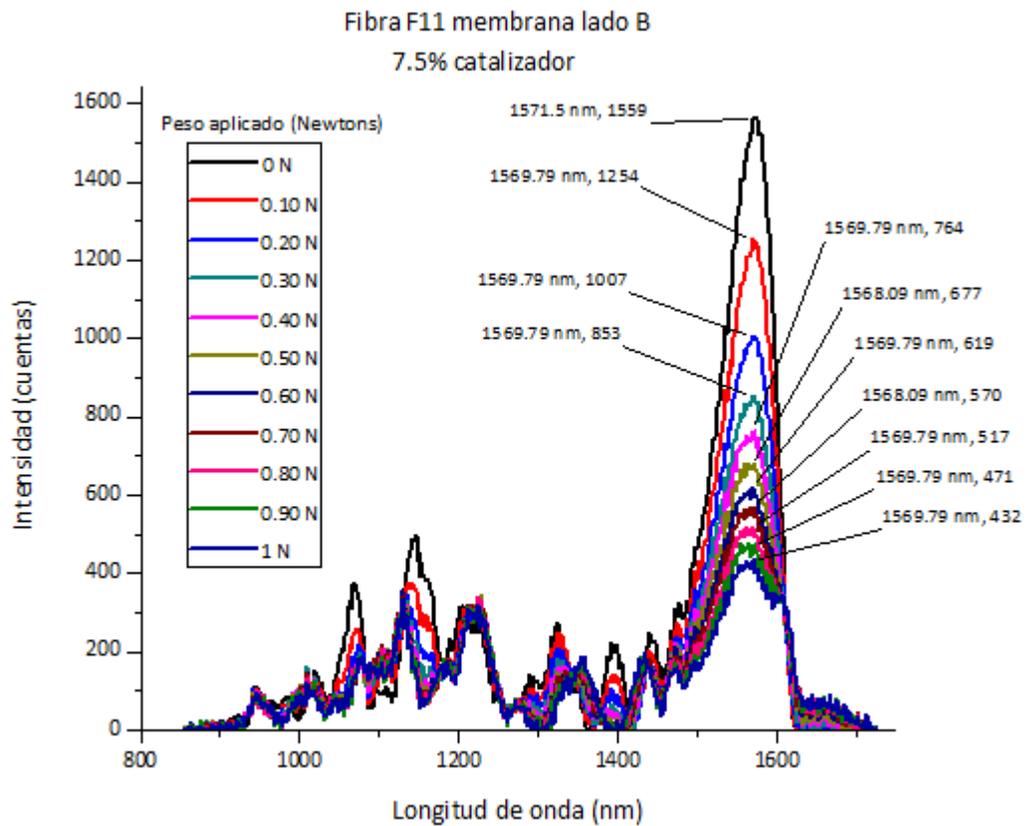
Las gráficas siguientes (Gráfica 4.1, Gráfica 4.2, Gráfica 4.3 y Gráfica 4.4) presentan los valores tanto de intensidad como la longitud de onda donde se presenta el máximo valor de intensidad. El peso aplicado a las membranas está dentro del rango de 0 – 1 Newton y se aplica a ambos lados de la membrana.





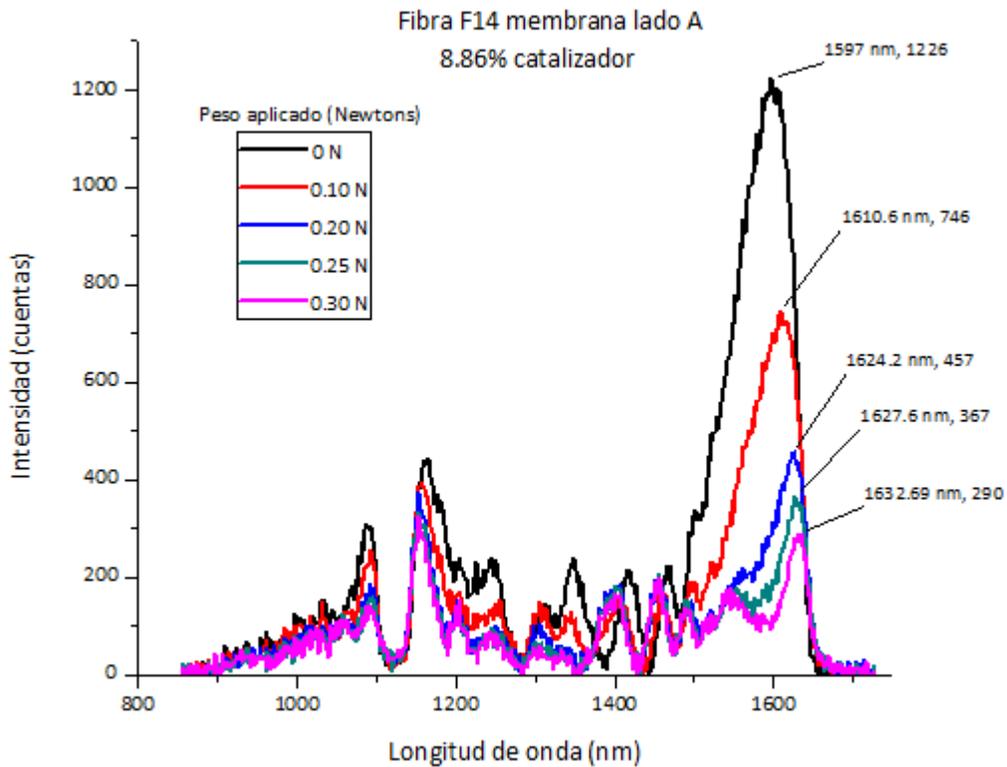
**Gráfica 4.1** a) Perfil de la fibra F11 lado A aplicando diferente peso, b) Valores de intensidad partiendo del punto máximo.

De acuerdo a los datos de la gráfica 4.1a; el valor de intensidad máxima se encuentra a 1569.79 nm y no a los 1555 nm para la que fue diseñada, esto es debido a que durante el proceso de curado de la membrana la fibra se flexionó. En la gráfica 4.1b se puede observar que los valores de intensidad en los diferentes pesos no se mantienen en los 1569.79 nm pero la intensidad en la misma longitud de onda para todos los pesos disminuye, esto indica que la fibra se está flexionando.



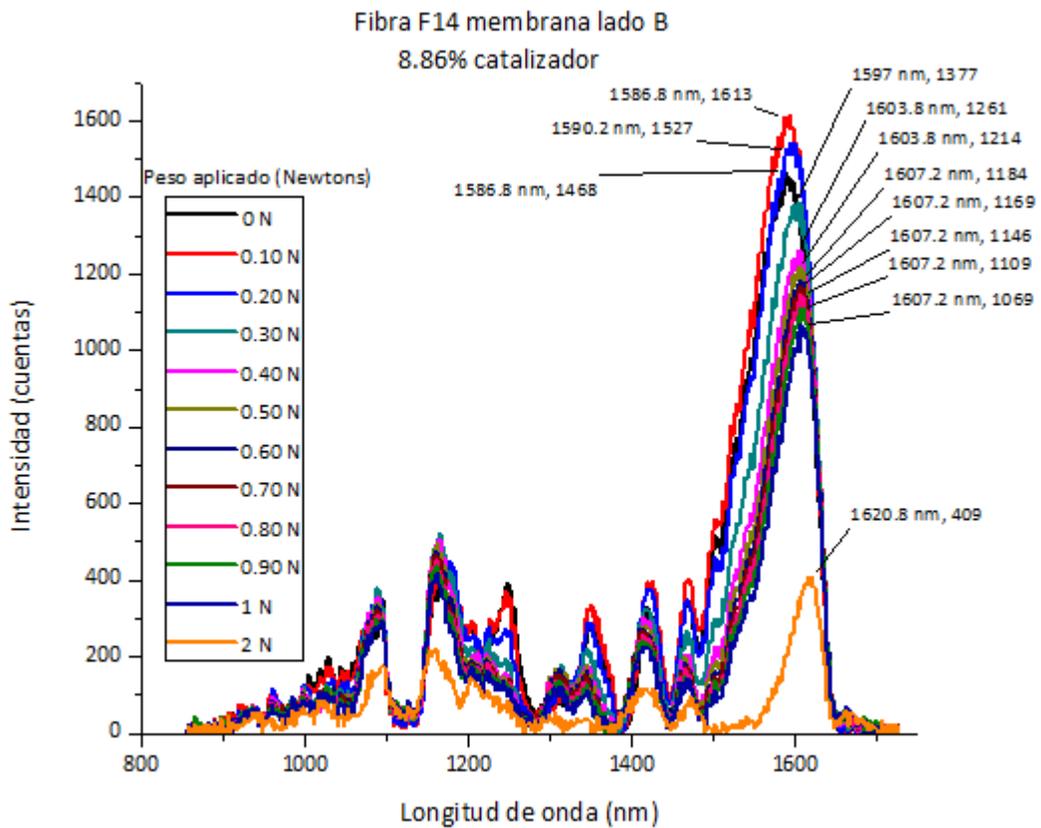
**Gráfica 4.2** Perfil de la fibra F11 lado B aplicando diferente peso.

La gráfica anterior indica que el máximo valor de intensidad se encuentra en 1571.5 nm, moviéndose el punto máximo en comparación del lado A (1569.79 nm), la causa probable son los bordes que se encuentran sobre este lado. Los valores de intensidad disminuyen conforme se aumenta el peso aplicado sobre la membrana.



**Gráfica 4.3** Perfil de la fibra F14 lado A.

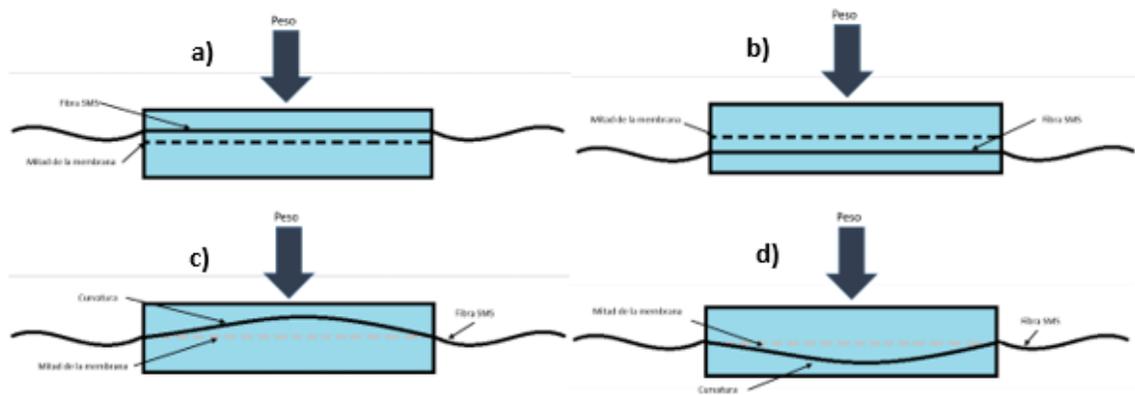
La gráfica anterior muestra que la fibra dentro de la membrana tiene curvatura debido al proceso de curado, ya que el punto máximo en valor de intensidad se encuentra en 1597 nm y es menor al de la otra membrana y al aplicar diferente peso los valores de intensidad disminuyen. Para este caso, solo se aplican hasta 0.30 N debido a que los valores de intensidad disminuyen drásticamente; la prueba no continua por posible fractura si se aplica más peso.



**Gráfica 4.4** Perfil de la fibra F14 lado B

La gráfica anterior muestra el punto máximo de intensidad a los 1586.8 nm que es diferente al lado anterior debido a los bordes sobre este lado. Este comportamiento es igual que en la otra membrana al cambiar de lado. El efecto de la curvatura en la fibra debido al proceso de curado es más evidente en esta fibra ya que el valor máximo sin aplicar peso es de 1468 cuentas, al aplicar el primer peso (0.1 N) la intensidad aumenta a 1613 cuentas después de volver a aumentar el peso (0.2 N) la intensidad comienza a disminuir y así sucesivamente al ir aumentando el valor del peso.

El comportamiento de la fibra se describe en la Figura 4.2.



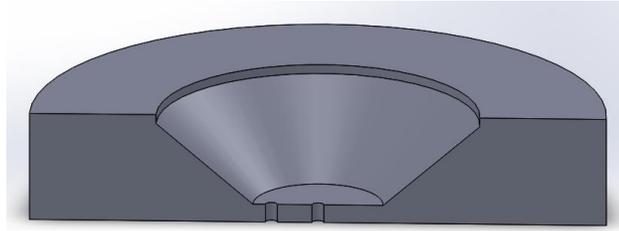
**Figura 4.2** a) Fibra por arriba de la mitad, b) Fibra por debajo de la mitad, c) Fibra con curvatura hacia arriba y, d) Fibra con curvatura hacia abajo.

La posición de la fibra dentro de la membrana afecta las mediciones, ya que se necesitaría establecer siempre un solo lado de operación, el cual limitaría el uso en caso de utilizar el caso d) o inclusive llegar a fracturar la fibra.

### 4.3 GEOMETRIAS PROPUESTAS PARA EL DISEÑO DEL CUERPO DEL SENSOR

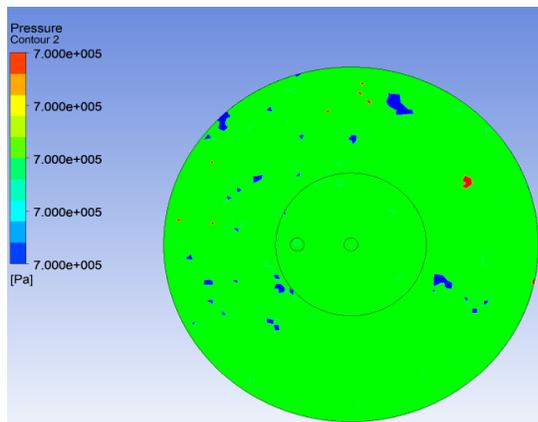
A continuación se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones con las cuatro geometrías propuestas para el cuerpo del sensor. De los cuales, el que presente mejor comportamiento en la parte superior (la máxima presión se concentre en el centro) será el ideal para continuar con el desarrollo del proyecto.

Los resultados de la primera geometría que corresponden al molde con interior cónico (Figura 4.3) en donde se incluye un escalón son los siguientes:

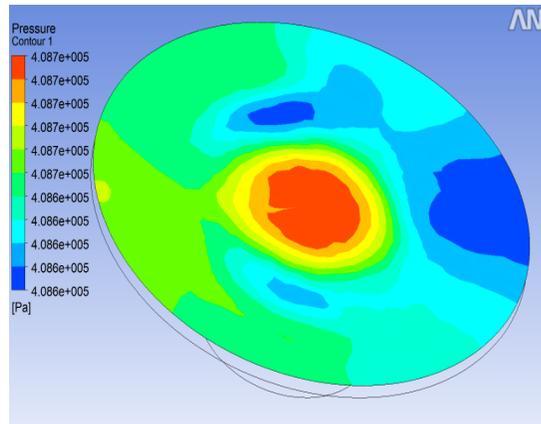


**Figura 4.3** Sección transversal del molde.

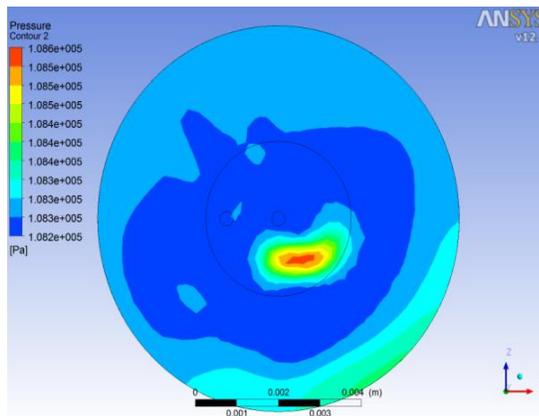
En el inicio de la prueba, la alimentación del fluido ejerce una presión uniforme sobre toda la superficie (Figura 4.4), se realiza una segunda medición de los 5 segundos de haberse realizado la prueba y se observa que la presión se concentra en la parte central de la superficie de contacto (Figura 4.5) pero a medida que continúa avanzando la prueba respecto al tiempo, el punto de concentración de la presión se recorre hasta que llega el punto en que queda desfasado del centro (Figura 4.6). El rango de presión varía de mayor a menor (408 kPa – 108.6 kPa).



**Figura 4.4** Contorno inicial de presión (vista desde la base).

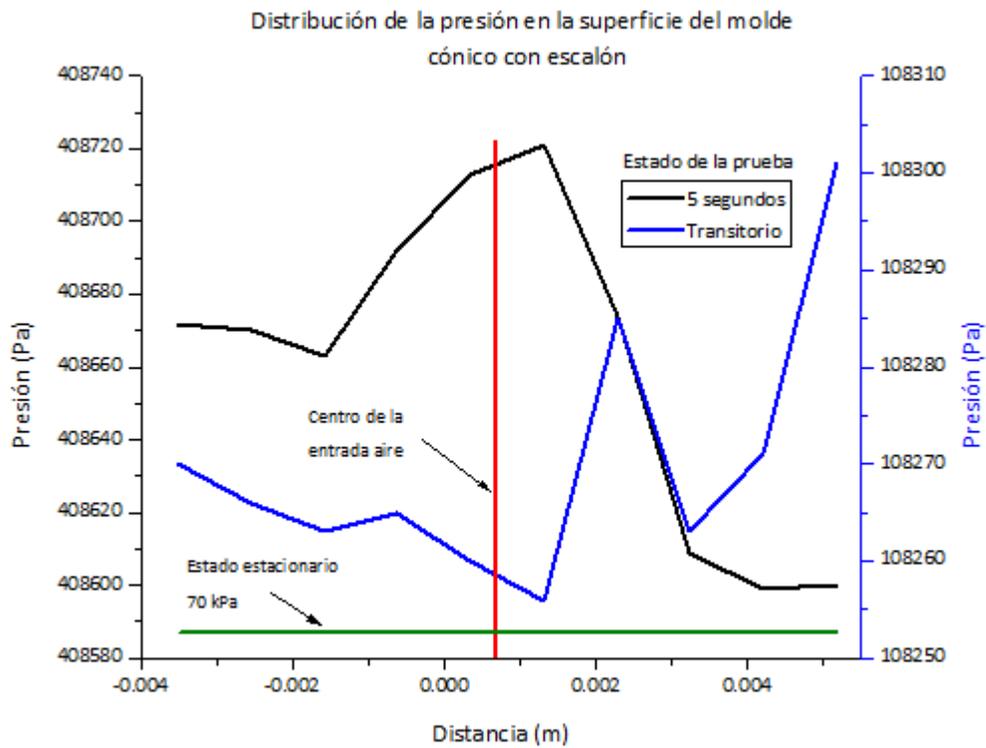


**Figura 4.5** Contorno de presión (transcurridos 5 seg).



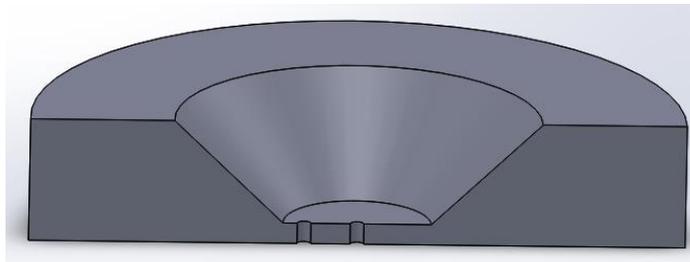
**Figura 4.6** Contorno final.

A continuación, se muestran los valores de presión dentro del molde a lo largo de la prueba (Gráfica 4.5). Se indica la posición en donde se concentra la presión en el diafragma.



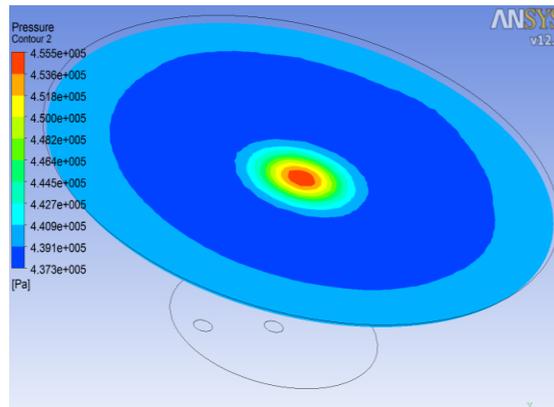
**Grafica 4.5** Estado inicial con presión constante, la línea roja indica la entrada del flujo (0.00083 m). Transcurridos 5 segundos la concentración se encuentra a 0.00048 m del centro y en la parte final a 0.00145 m.

Los resultados obtenidos para el molde de interior cónico sin escalón (Figura 4.7) son los siguientes:

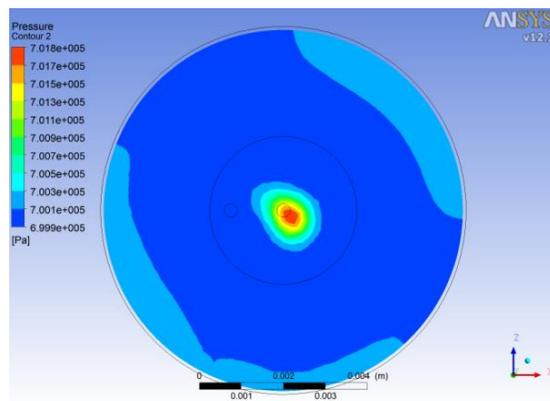


**Figura 4.7** Sección transversal del molde.

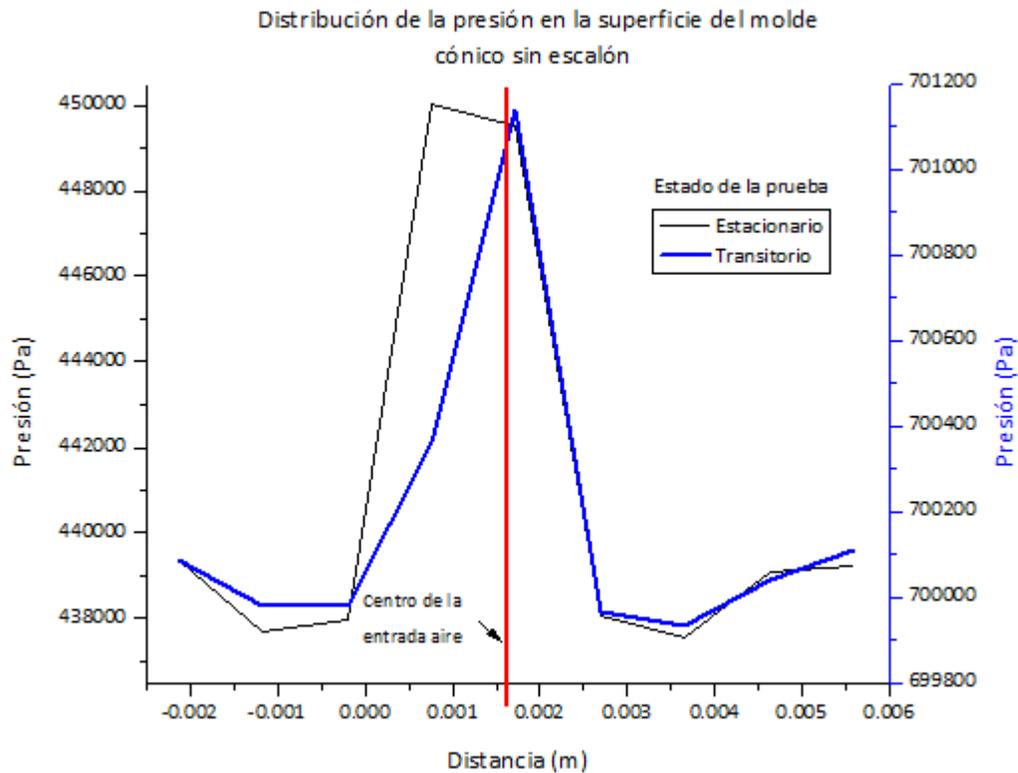
A diferencia del caso anterior (Figuras 4.4 y 4.5) la distribución de la presión en la parte inicial de la prueba es más estable, concentrándose de manera uniforme en el centro de la parte superior de la geometría (Figura 4.8), aunque existe un aumento de presión en las orillas del molde. En la parte final de la prueba la presión continúa desfasándose del centro, pero en menor proporción (Figura 4.9) y los aumentos de presión en las orillas del molde disminuyen. El valor de la presión alcanzada en el inicio es de 455.5 kPa y en la parte final de 701.8 kPa, las cuales aumentan en la parte inicial en un 10.42% y en la parte final es mucho mayor el aumento, 84.52% respecto a los valores del molde cónico con escalón. Los valores de presión se muestran a continuación (Gráfica 4.6).



**Figura 4.8** Contorno inicial de presión.



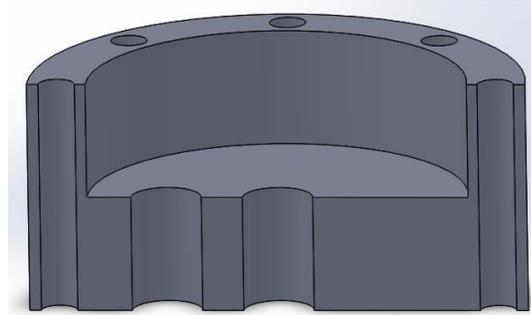
**Figura 4.9** Contorno final, vista desde la base.



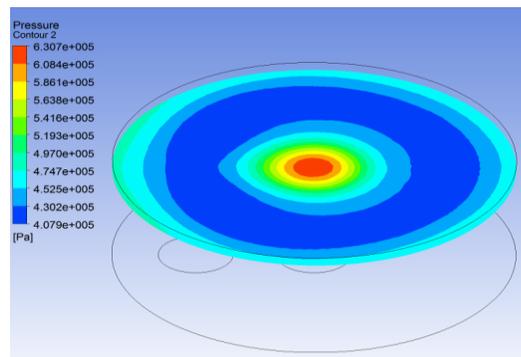
**Gráfica 4.6** El centro se encuentra a los 0.001725 m, el punto máximo para el inicio de la prueba se encuentra a 0.00096 m del centro y para la parte final se encuentra a 0.000005 m del centro.

En el caso del molde existente de interior cilíndrico (Figura 4.10) muestra que en la parte inicial de la simulación el contorno de presión va de mayor en las orillas del molde a menor y conforme se acerca al centro de la superficie se incrementa concentrándose en el punto de la entrada del flujo (Figura 4.11), esto puede ocasionar problemas en las mediciones futuras para el trabajo que se busca realizar si se mantuviera así el comportamiento a lo largo de la simulación. Al final de la prueba se muestra lo que ha sido una constante en los resultados de las simulaciones (Figura 4.12), la concentración de la presión en la parte superior está desfasada del centro, sucede algo similar a lo que se presenta en las Figuras 4.8 y Figura 4.9. El valor de la presión (Gráfica 4.7) en el inicio de la prueba es de 630.7 kPa y al finalizar es de 715 kPa, se registra

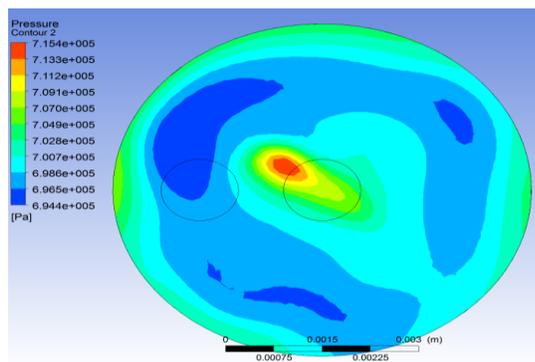
un aumento del 38.46 % y 1.8% respectivamente en comparación de los datos del molde de interior cónico con escalón.



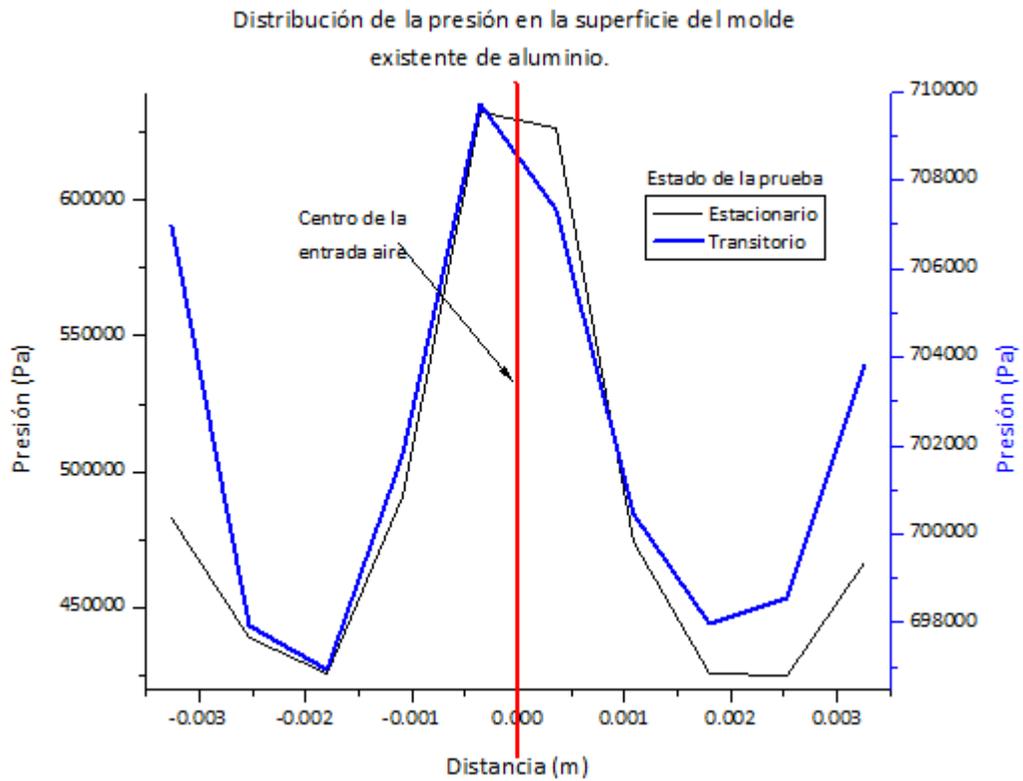
**Figura 4.10** Sección transversal del molde.



**Figura 4.11** Contorno inicial de presión.

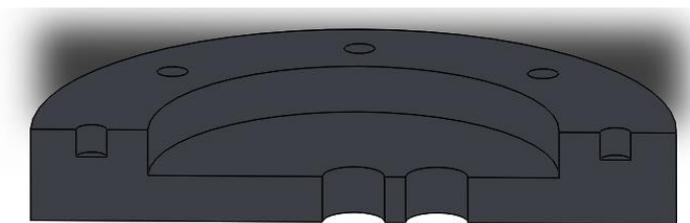


**Figura 4.12** Contorno final, vista desde la base.



**Grafica 4.7** Para este caso, el centro de la superficie se encuentra en los 0.0 m. La concentración de presión en el inicio y final de la prueba se encuentra en 0.00036 m.

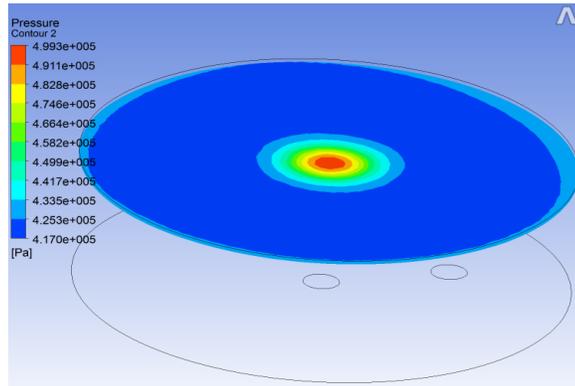
Para la última geometría, el molde de interior cilíndrico de menor altura que del existente de aluminio (Figura 4.13).



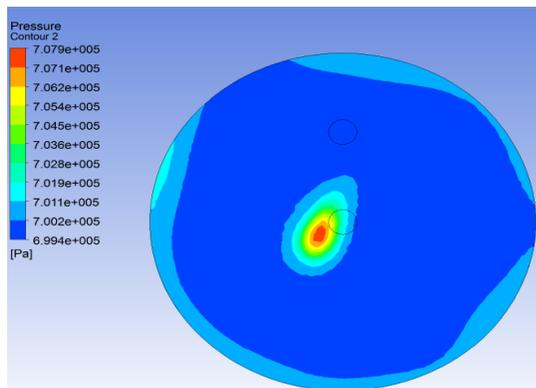
**Figura 4.13** Sección transversal del molde.

El inicio de la prueba muestra una distribución de presión mejor que en las tres pruebas anteriores (la zona cercana a las paredes de la superficie disminuye), la presión se concentra en la parte central como en las pruebas anteriores pero existe una zona más amplia donde la presión es menor en comparación del punto máximo, brindando una mejor área para medición la cual es requerida para el proyecto (Figura 4.14). En la parte final de la prueba se repite el fenómeno del desfase del punto máximo de concentración de presión y las zonas cercanas a las paredes se observa un aumento de presión (Figura 4.15). Tomando como referencia los valores de presión del molde cilíndrico sin escalón para motivos de comparación, la presión máxima de inicio es de 499.3 kPa y en la parte final de la prueba la presión máxima es de 707.9 kPa (Gráfica 4.8). Comparando estos valores obtenidos con los valores de referencia tenemos que en el inicio de la prueba se tiene un aumento del 9.61% mientras que en la parte final de la prueba disminuye un 0.9%.

Las siguientes imágenes describen el molde y el comportamiento del flujo en la parte superior.

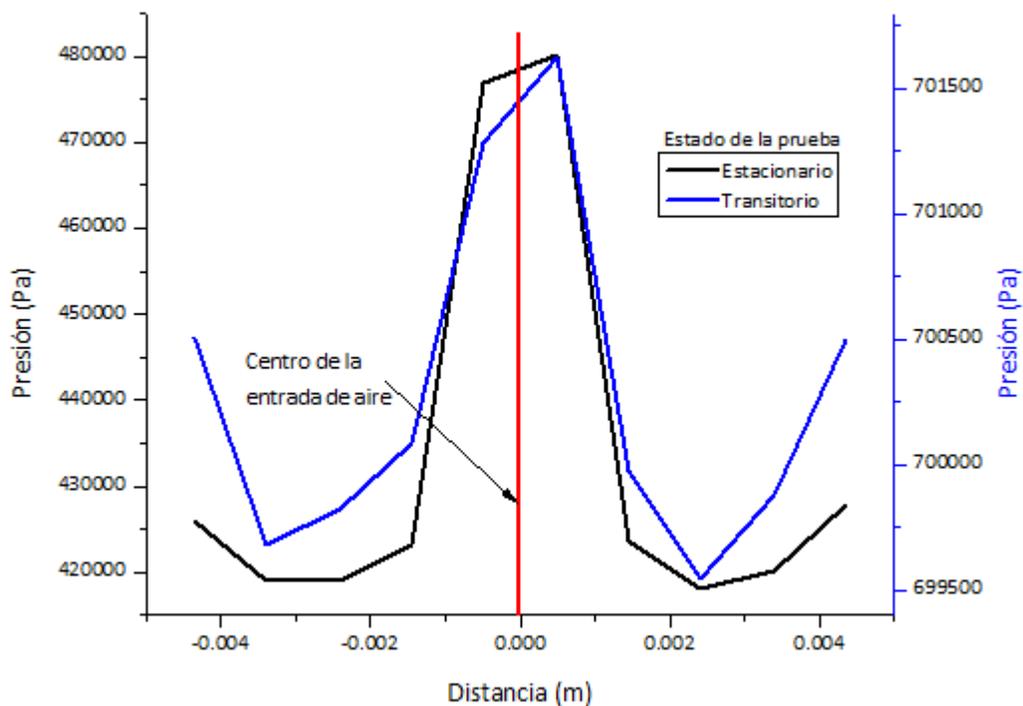


**Figura 4.14** Contorno inicial de presión.



**Figura 4.15** Contorno final, vista desde la base.

Distribución de la presión en la superficie del molde de interior cilíndrico.



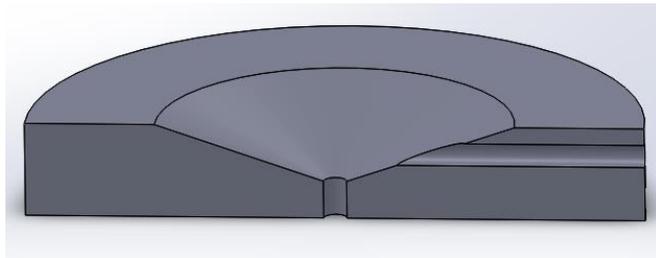
**Gráfica 4.8** El centro donde se localiza la entrada de presión es 0 m. Los puntos máximos registrados en el inicio y final de la prueba se encuentran en 0.00048 m.

Con los resultados obtenidos de las simulaciones, se descartan el molde interior cónico con escalón y el molde de aluminio existente debido al

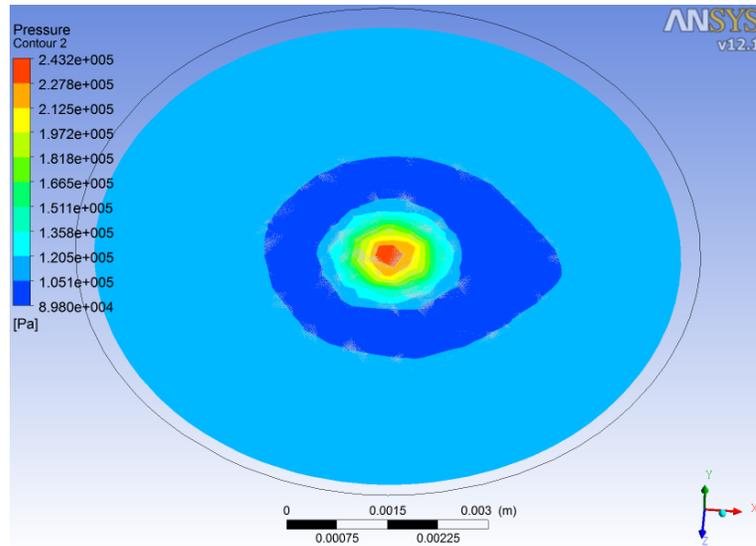
comportamiento de la concentración de la presión al final de la prueba. Las dos simulaciones restantes presentan variaciones tanto de la presión de entrada como la de salida menores al 10%, de estos dos, la geometría que presenta los mejores resultados es la de interior cilíndrico de altura menor al molde existente de aluminio (última geometría propuesta) debido a que presenta una mejor distribución y concentración de la presión a lo largo de toda la prueba (Figura 4.13).

Una variante a las pruebas realizadas, es la de cambiar la ubicación (la entrada de flujo en la base y la salida a un costado o viceversa) o quitar un orificio del molde y que funcione como entrada – salida, para observar su comportamiento en espera de obtener mejores resultados en cuanto a la distribución de la presión.

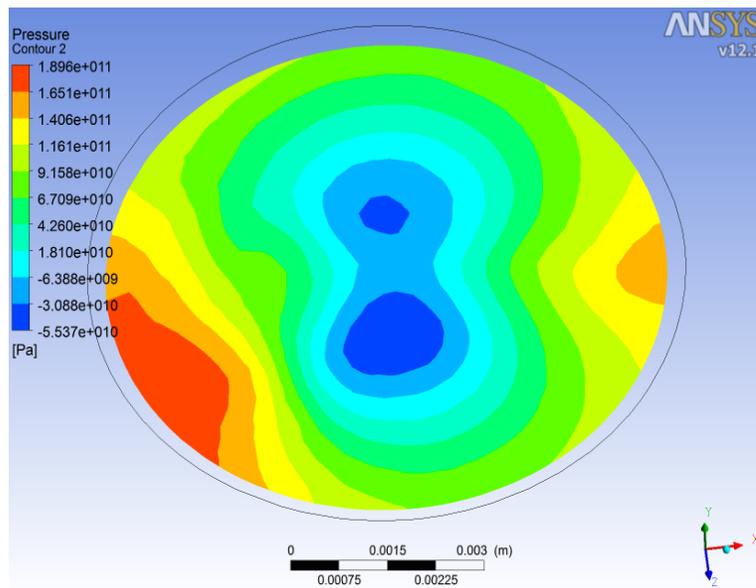
Las siguientes figuras describen el comportamiento de los moldes con las variantes antes mencionadas.



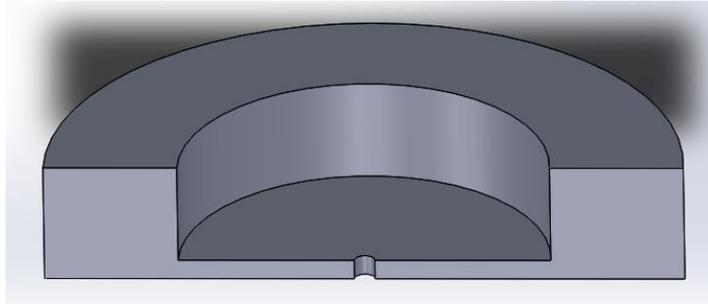
**Figura 4.16** Molde conico sin escalón con entrada lateral de flujo y salida en la base, sección transversal.



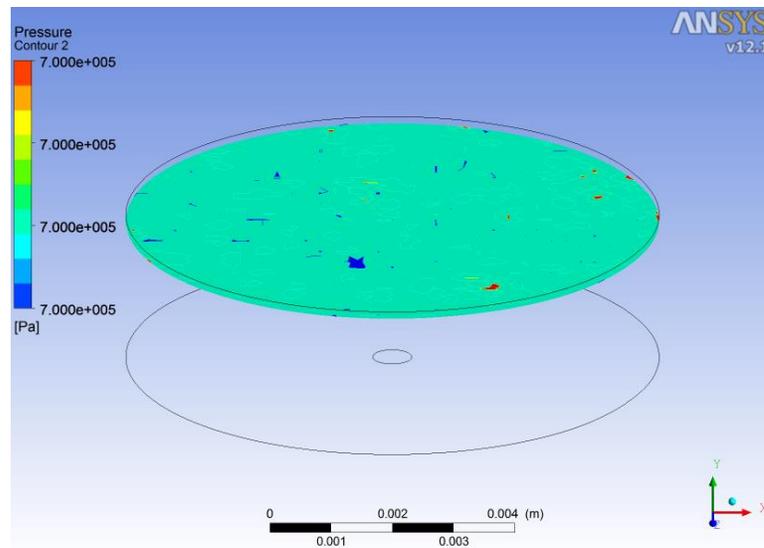
**Figura 4.17** Molde cónico sin escalón, salida lateral (inicio de la prueba).



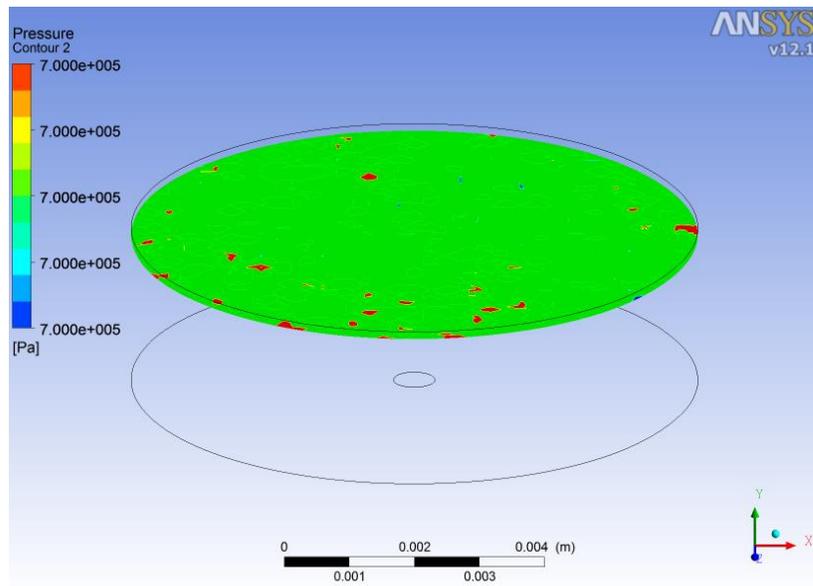
**Figura 4.18** Molde cónico sin escalón, salida lateral (término de la prueba).



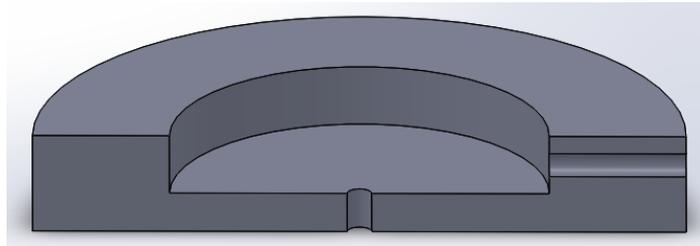
**Figura 4.19** Molde interior cilíndrico de baja altura con un solo orificio en la base, sección transversal.



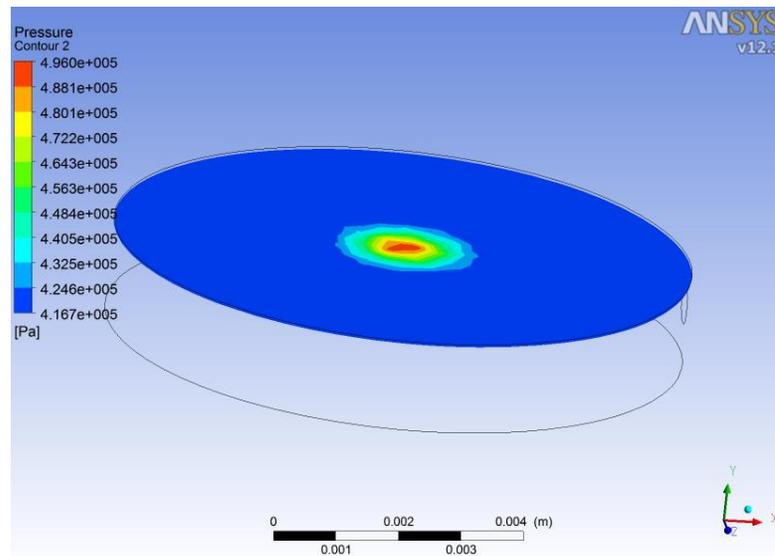
**Figura 4.20** Molde interior cilíndrico de baja altura con un solo orificio en la base (inicio de la prueba).



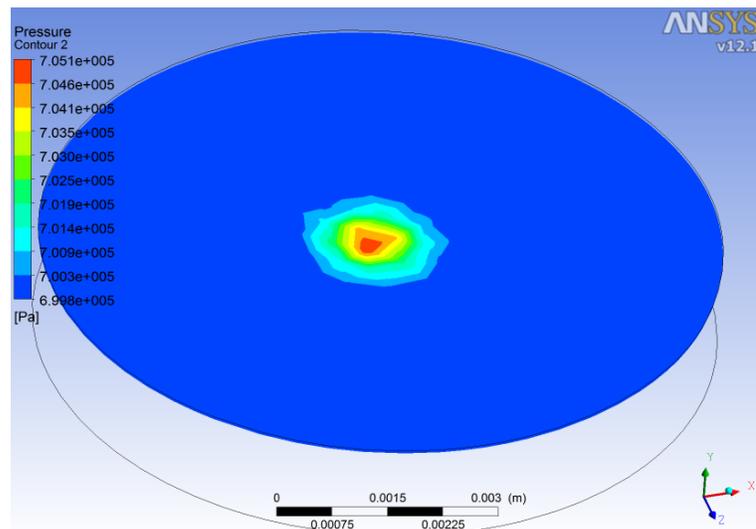
**Figura 4.21** Molde de interior cilíndrico de baja altura con un solo orificio en la base (término de la prueba).



**Figura 4.22** Molde interior cilíndrico de baja altura y salida lateral, sección transversal.



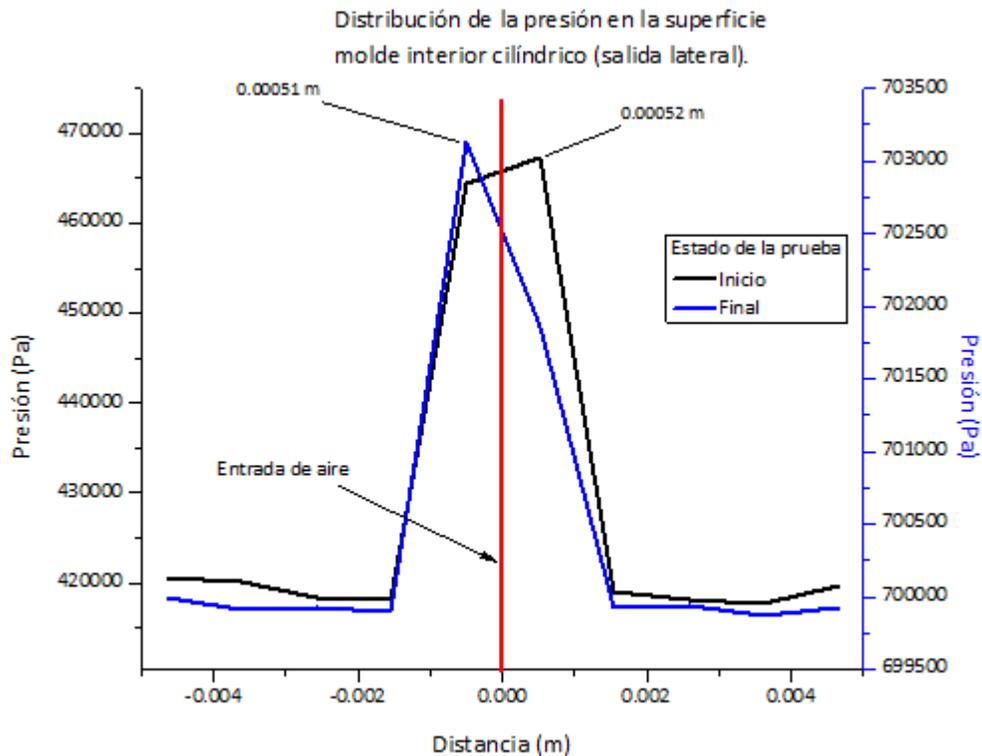
**Figura 4.23** Molde interior cilíndrico de baja altura y salida lateral (inicio de la prueba).



**Figura 4.24** Molde interior cilíndrico de baja altura y salida lateral (término de la prueba).

Para el molde de interior cilíndrico de baja altura con un solo orificio de entrada en la parte inferior la presión permanece constante a lo largo de la prueba (Figura 4.20 y Figura 4.21). Para el mismo molde, pero de salida lateral (Figura

4.23 y Figura 4.24) el punto máximo de presión al inicio y fin de la prueba se encuentra a 0.0005 m. A continuación, se muestran los resultados (Gráfica 4.9).



**Gráfica 4.9** Localización de los valores máximos de presión en el molde de interior cilíndrico con salida lateral.

Los mejores resultados se obtienen del molde de interior cilíndrico de baja altura con la salida lateral, ya que reduce la presión en las orillas del molde y una concentración más marcada (el área se reduce) a comparación del molde con los dos orificios en la base; también se observa que los puntos máximos para el primer caso se encuentran a 0.0005 m a la derecha al inicio de la prueba cambiando al lado izquierdo la misma distancia para el final de la prueba. La diferencia de los puntos de presión máxima en el molde con los dos orificios en la base es que los puntos se mantienen en la misma posición

durante toda la prueba (0.0004 m a la derecha del centro) a comparación del molde anterior en el que los puntos cambian de lugar mientras se realiza la prueba.

De acuerdo a lo anterior, el comportamiento de la presión en el molde con dos orificios en la base es el adecuado para la realización del prototipo, por lo tanto, se procede a la fabricación de un molde de interior cilíndrico de baja altura y su respectiva tapa.

#### **4.4 MEDICION DE LA INTENSIDAD DE LAS FIBRAS DENTRO DE LAS MEMBRANAS (0 – 25 psi)**

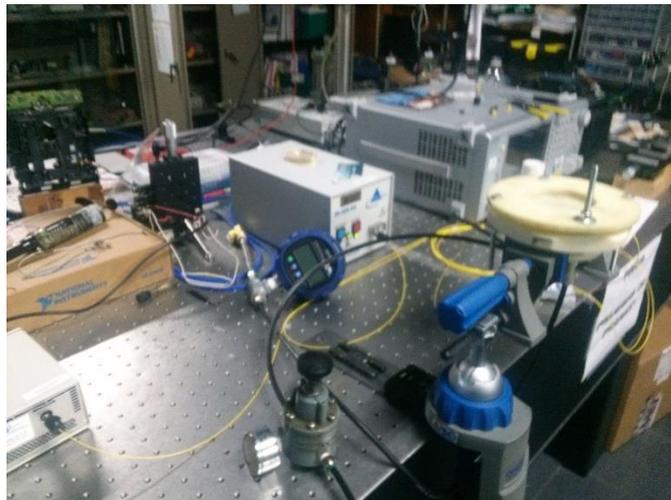
Para la realización de estas pruebas se utiliza el segundo lote de membranas (Tabla 4.2), ya que los puntos máximos de intensidad de estas fibras a comparación de las fibras del primer lote se encuentran más cercanos a los 1555 nm, que es el punto óptimo de operación. Todas estas fibras serán caracterizadas esperando encontrar las idóneas para las pruebas aplicando presión.

**Tabla 4.2** Segundo lote de membranas de PDMS.

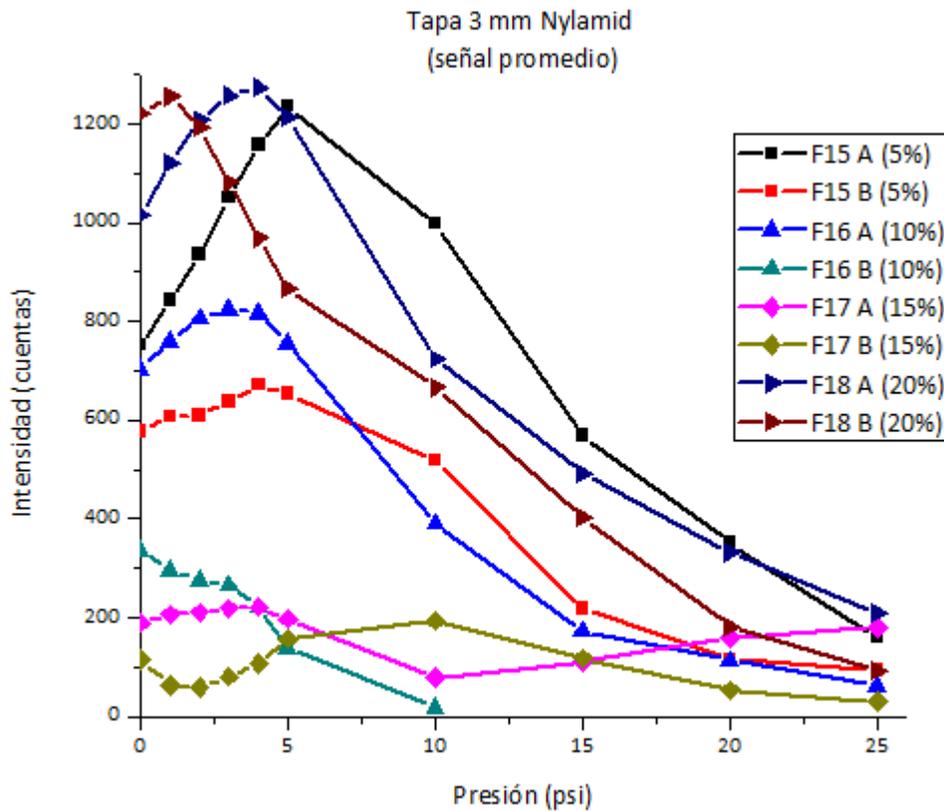
Fibra No.	Relación de catalizador	Porcentaje de catalizador	PDMS utilizado (gramos)	Catalizador utilizado (gramos)	Total (gramos)
15	10:0.5	5%	35	1.75	36.75
16	10:1	10%	35	3.5	38.5
17	10:1.5	15%	35	5.25	40.25
18	10:2	20%	35	7	42

Una vez que se ha instalado el arreglo (Figura 4.25) para la obtención de la intensidad de las fibras dentro de las membranas (Cap. 3, Figura 3.30) se procede a realizar cinco pruebas para cada fibra, de cada uno de sus dos lados

a diferentes presiones e intercambiando los espesores de la tapa entre 3 mm y 5 mm. Los resultados de los valores promedio para ambas tapas y lados se muestran en las siguientes gráficas (4.10 y 4.11) el valor de la intensidad que se muestra es el obtenido en una longitud de onda de 1555 nm.

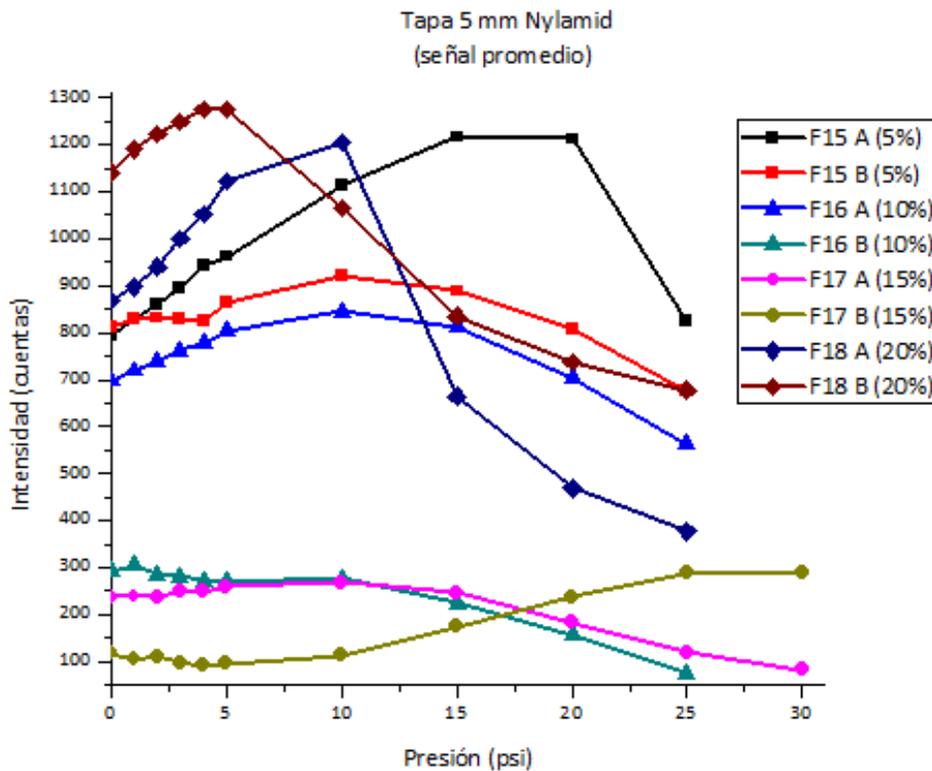


**Figura 4.25** Arreglo para la medición de intensidad de las fibras.



**Gráfica 4.10** Valores promedio obtenidos del perfil de las fibras SMS por ambos lados, utilizadas en una tapa de 3 mm de espesor aplicando una presión en un rango de 0 a 25 psi.

De la gráfica anterior se puede observar que la fibra F15 presenta dos rangos de operación en distintos rangos de intensidad, para el lado A: 0 a 5 psi la cual presenta una mayor sensibilidad y 5 a 25 psi que por su pendiente suave tiene baja sensibilidad, lado B: 0 a 4psi y 4 a 25 psi que en ambos casos presenta una baja sensibilidad a los cambios de presión. Para las fibras F16 y F17 en ambos lados presentan valores bajos de intensidad. Por último, la fibra F18 presenta altos valores de intensidad para ambos lados, así como comportamiento similar, siendo la diferencia los rangos de operación, para el lado A: 0 a 1 psi y 1 psi a 25 psi, lado B: 0 a 5 psi y 5 a 25 psi, presentando una sensibilidad mayor en los rangos superiores.



**Gráfica 4.11** Valores promedio obtenidos del perfil de las fibras SMS por ambos lados, utilizadas en una tapa de 5 mm de espesor aplicando una presión en un rango de 0 hasta 30 psi.

Con los datos obtenidos de la gráfica anterior la fibra F15 lado A presenta un rango de operación mayor: 0 a 20 psi a comparación de la tapa de 3 mm, para el lado B el rango se reduce siendo de 0 a 4 psi. El comportamiento para las fibras F16 y F17 continúan presentando bajos valores de intensidad. La fibra F18 presenta un cambio en el comportamiento de la intensidad a comparación de la tapa de 3 mm de espesor; mientras que el rango de operación para el lado A es de 0 a 5 psi y de 10 a 25 psi y el lado B de 0 a 5 psi y de 5 psi a 25 psi, se puede apreciar que en todos los casos las membranas presentan una baja sensibilidad debido a la pendiente suavizada.

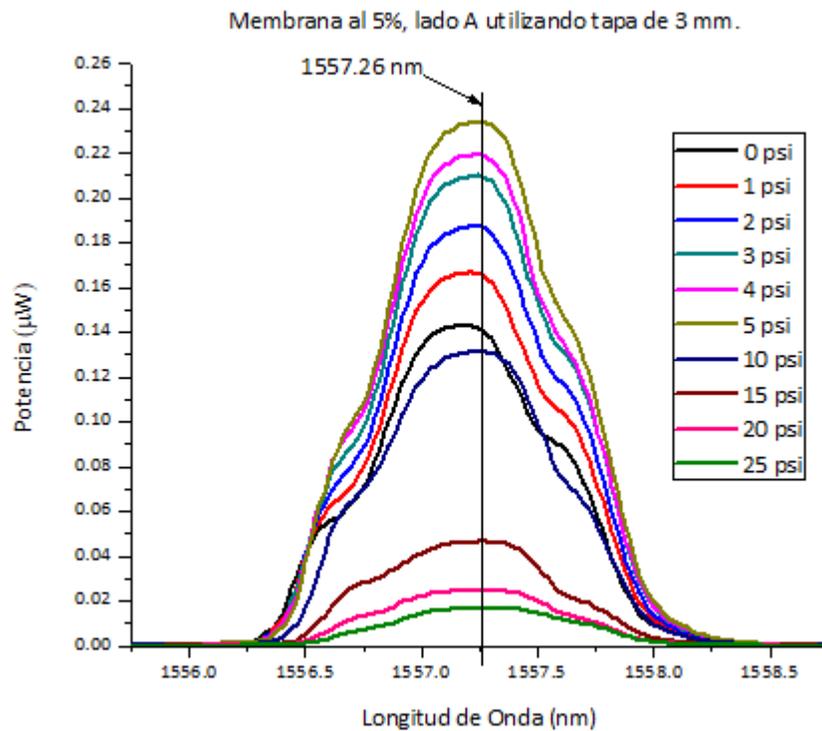
Con los resultados obtenidos con ambas tapas, hasta este punto las fibras F15 y F18 son las que presentan mejor comportamiento en ambos lados. Se siguen presentando comportamientos en las fibras que permiten utilizar dos rangos de operación debido a la curvatura que se presenta durante el proceso de fabricación de la membrana.

#### **4.5 MEDICION DE LA POTENCIA EN LAS FIBRAS DENTRO DE LAS MEMBRANAS FABRICADAS AL 5%, 10%, 15% Y 20% DENTRO DEL RANGO DE 0 A 25 PSI**

En esta etapa se realiza el cambio de medición de intensidad utilizando una fuente de luz a la medición de la potencia que pasa a través de la fibra dentro de la membrana utilizando un diodo láser a 1555 nm<sup>3</sup> y con la ayuda de un analizador de espectro óptico (OSA por sus siglas en inglés) se puede obtener el perfil de la fibra a diferentes presiones. Como muestra de todo el proceso de la adquisición y manejo de datos, se presentan todos los pasos únicamente para la membrana al 5% de catalizador con la fibra F15 del lado A; este procedimiento se repetirá para cada membrana, por ambos lados y en cada una de las dos tapas (Gráfica 4.12), y se promedian los datos obtenidos de cinco pruebas en función de la presión (Gráfica 4.13). Por último, se obtiene un modelo matemático de los valores promedio (Gráfica 4.14) el cual se utilizará en la etapa de adquisición de datos.

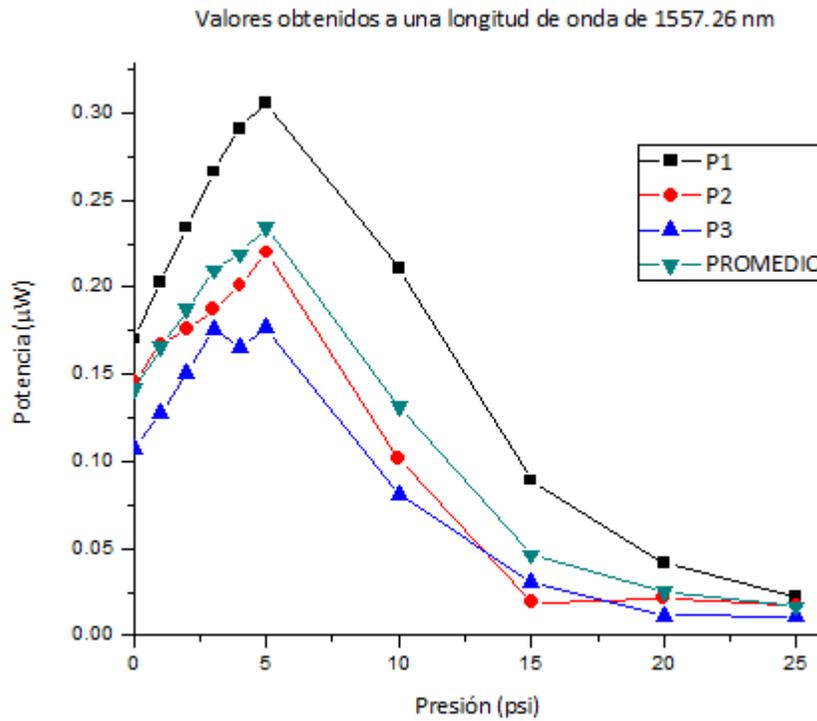
---

<sup>3</sup> Durante todas las pruebas, la alimentación del diodo láser es 20.55 mA.



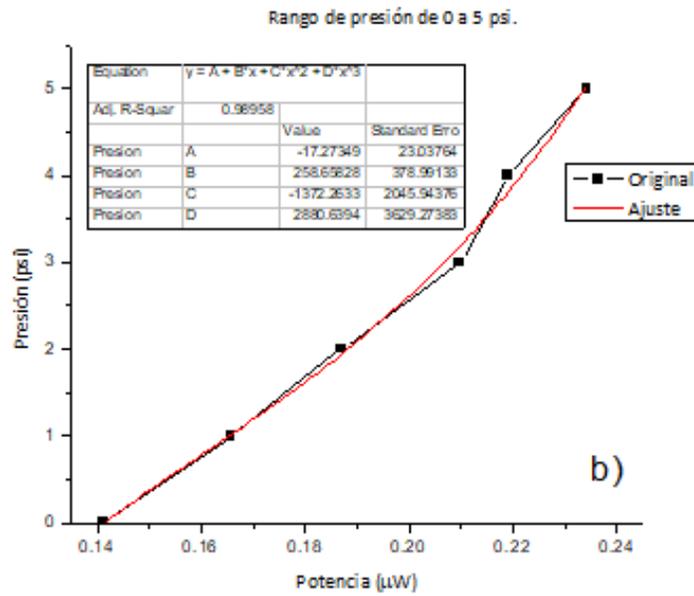
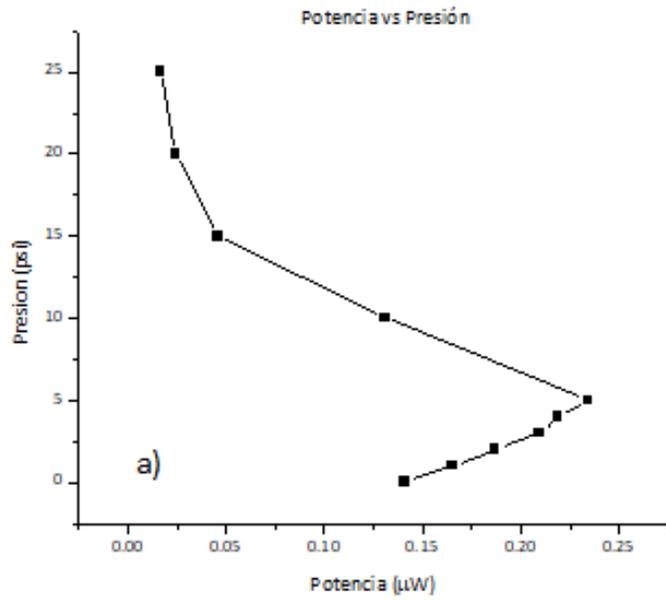
**Gráfica 4.12** Valores de potencia a través de la fibra dentro de la membrana, el valor máximo se encuentra en 1557.28 nm.

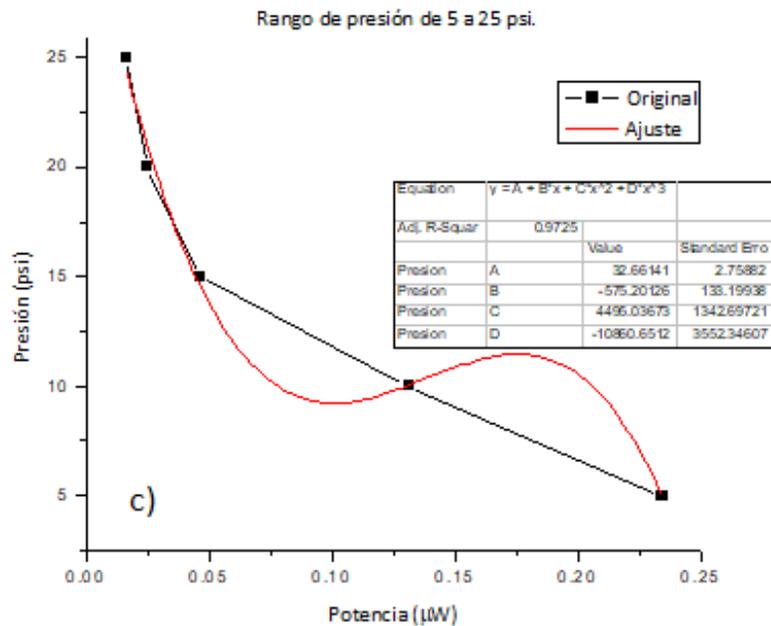
En la gráfica se observa que al aplicar presión en la membrana los valores de potencia disminuyen. Los valores de la potencia óptica que presenta cada fibra dentro de la membrana permitirán conocer si su funcionamiento es óptimo para utilizarla en las pruebas. Cabe recordar que la longitud de onda de trabajo es 1555 nm, en este caso, la máxima potencia se encuentra fuera del rango de operación.



**Gráfica 4.13** Valores obtenidos en el rango de 1555 nm (pruebas y valor promedio). Todos graficados en función de la presión.

A comparación de la gráfica 4.12 se puede observar que los valores de potencia comienzan a aumentar dentro del rango de 0 a 5 psi, después de eso la potencia disminuye presentando el mismo comportamiento que originalmente tenía.





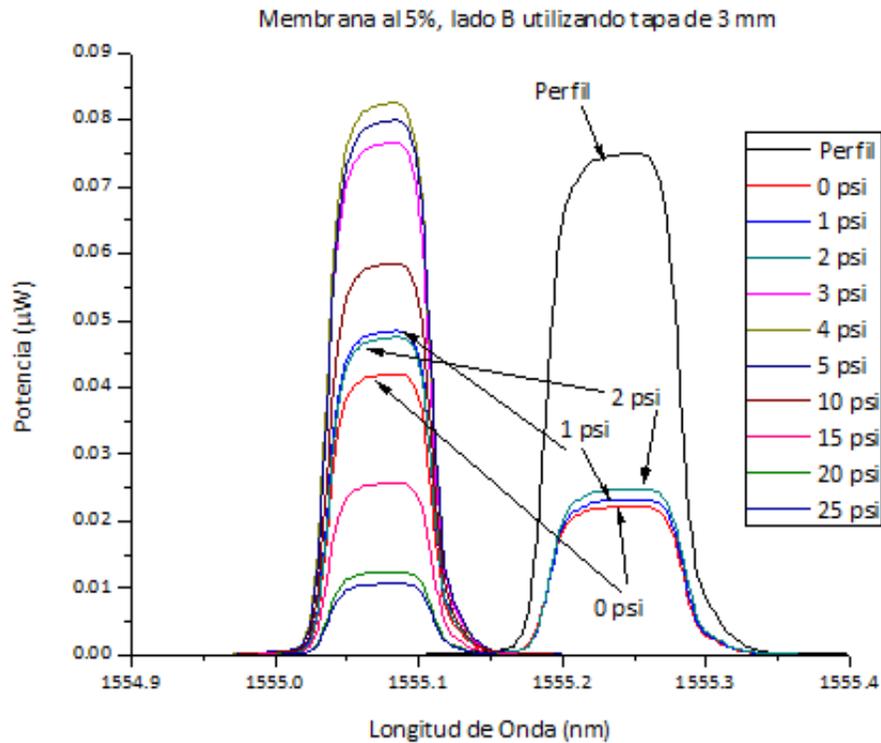
**Gráfica 4.14** a) gráfica Potencia vs Presión, b) modelo matemático para el rango de 0 a 5 psi, c) modelo matemático para el rango de 5 a 25 psi.

En a) se muestran los valores obtenidos en función de la potencia que pasa a través de la fibra, se observa que el comportamiento no es lineal, pero se puede trabajar en dos rangos de presión. Para b) y c) al tener dos rangos de operación a distintas presiones se obtiene su modelo matemático para cada caso. Al final de todo el proceso para la membrana al 5% del lado A, funciona perfectamente dentro del rango de 0 a 5 psi, en donde se puede apreciar una mayor sensibilidad que en el rango de 5 a 25 psi.

Como se mencionó; la señal promedio en función de la presión y el modelo matemático que se muestran para la membrana al 5% se repetirán para las otras 3 membranas restantes.

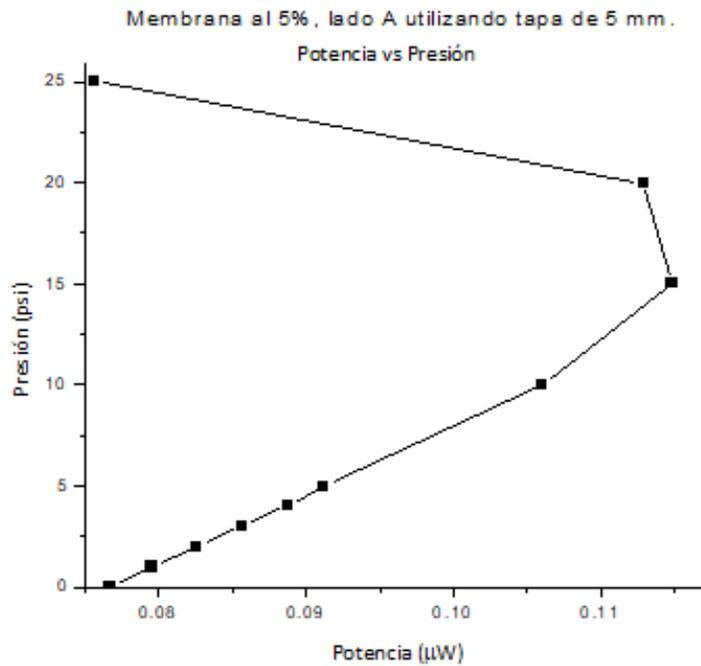
A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la potencia máxima de la fibra dentro de la membrana al 5% de catalizador del lado B. Se observa un comportamiento extraño, dentro del rango de 0 a 3 psi los valores se

duplican a diferente longitud de onda en cuanto al perfil, por tal motivo se descarta su operación sobre ese lado (Gráfica 4.15).

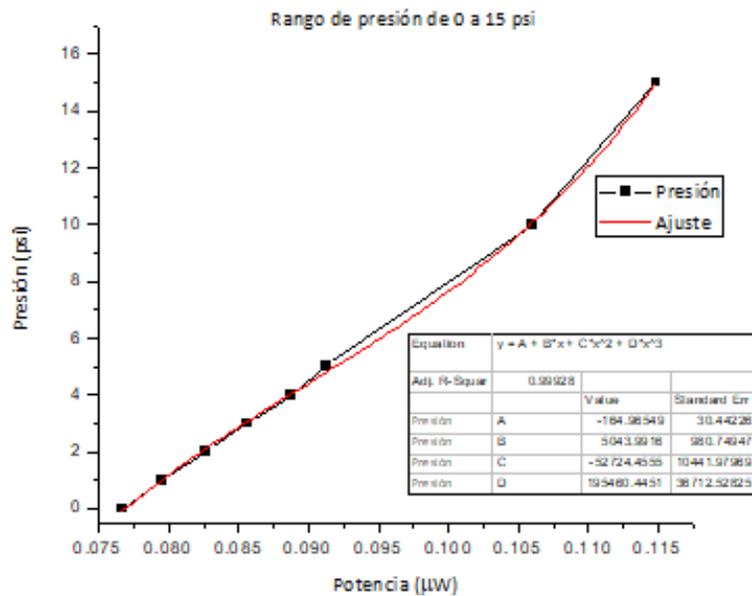


**Gráfica 4.15** Comportamiento de la potencia en el lado B de la membrana al 5%.

Las gráficas para el lado B de la membrana al 5% en la tapa de 3 mm se descartan debido al comportamiento errático que presentan. En las siguientes gráficas se presenta el valor promedio de la señal en función de la potencia utilizando la tapa de 5 mm de espesor, estableciendo los posibles rangos de operación para cada membrana y su modelo matemático (grafica 4.16).



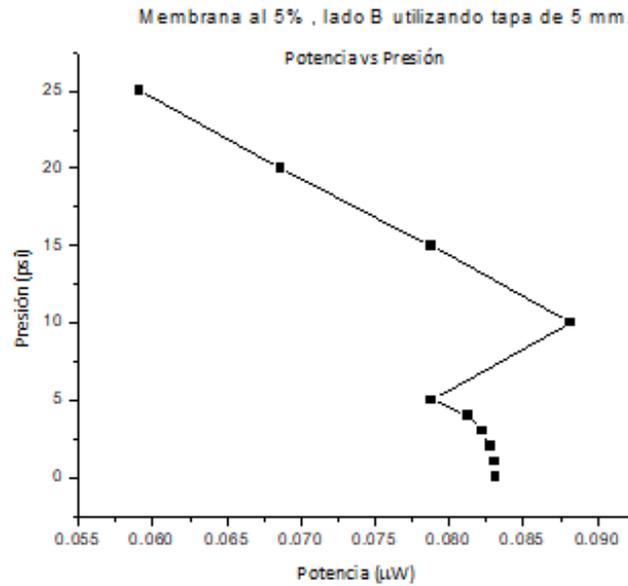
a) Valor promedio de la señal, se establecen dos rangos de operación.



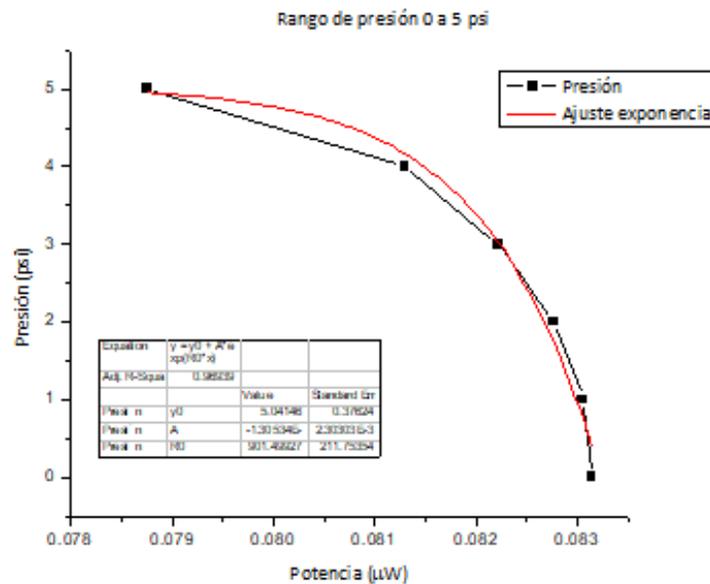
b) Modelo matemático del rango de 0 a 15 psi.

Gráfica 4.16 a) Señal promedio, b) Modelo matemático.

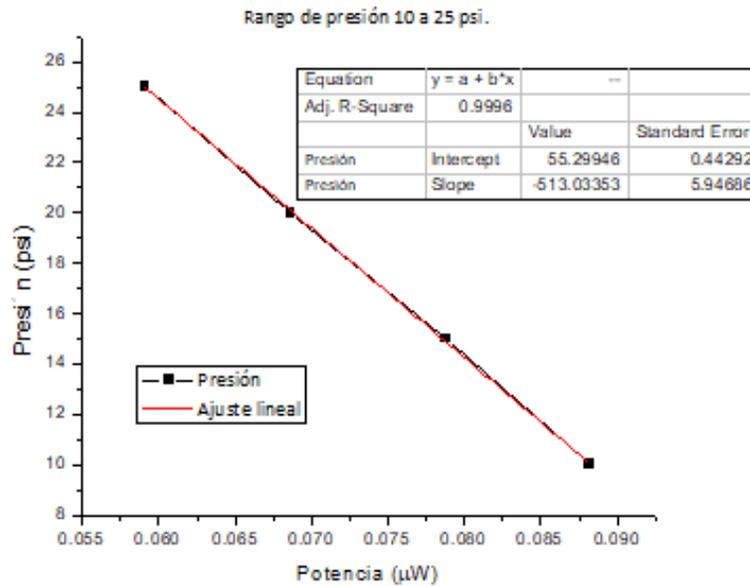
La señal promedio presenta dos rangos de operación siendo el de 0 a 15 psi el adecuado para su operación presentando una alta sensibilidad, descartando el rango de 15 a 25 psi debido a que al aumentar la presión ésta disminuye rápidamente, evitando una posible falla en la fibra dentro de la membrana.



a) Señal promedio.



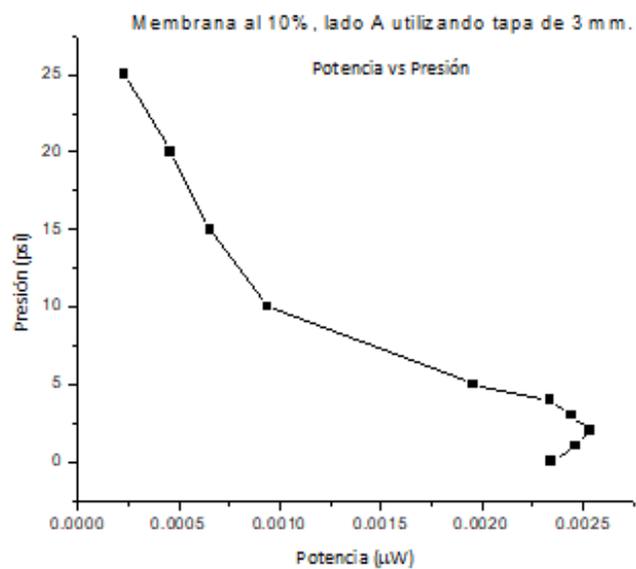
b) Rango de operación.



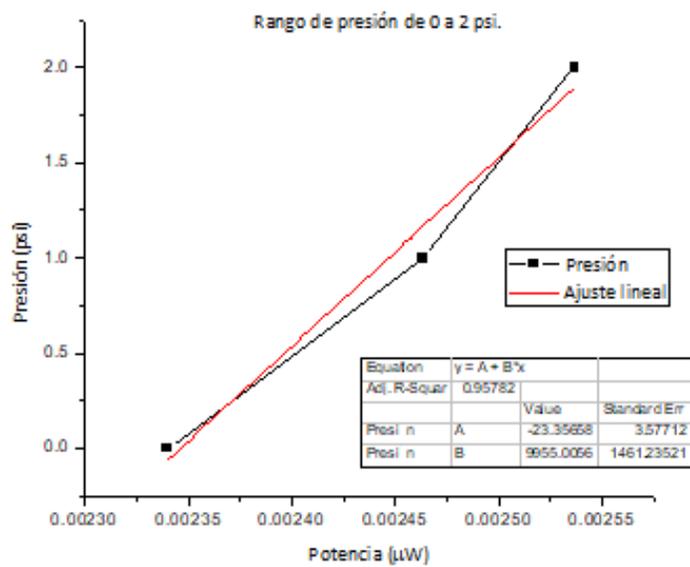
c) Rango de operación.

**Gráfica 4.17** a) Perfil de la membrana en función de la potencia donde se puede observar que puede funcionar en dos diferentes rangos de presión, b) El primer rango de presión es de 0 a 5 psi, c) El segundo rango de presión es de 10 a 25 psi.

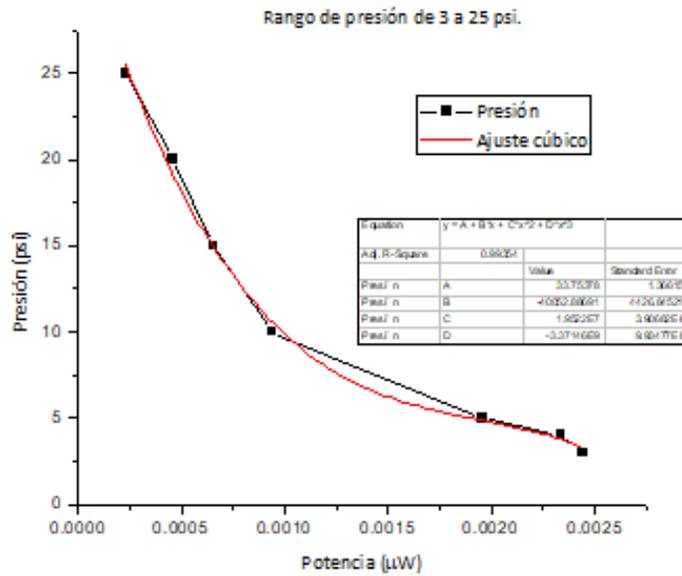
Los resultados para la membrana al 5% lado B presentan dos rangos donde puede operar, el primero de 0 a 5 psi en donde la sensibilidad es baja a comparación del segundo rango que esta entre 10 y 25 psi, en este último no es recomendable aplicar más presión ya que la potencia disminuye y puede indicar un posible fallo en la fibra.



a) Señal promedio.



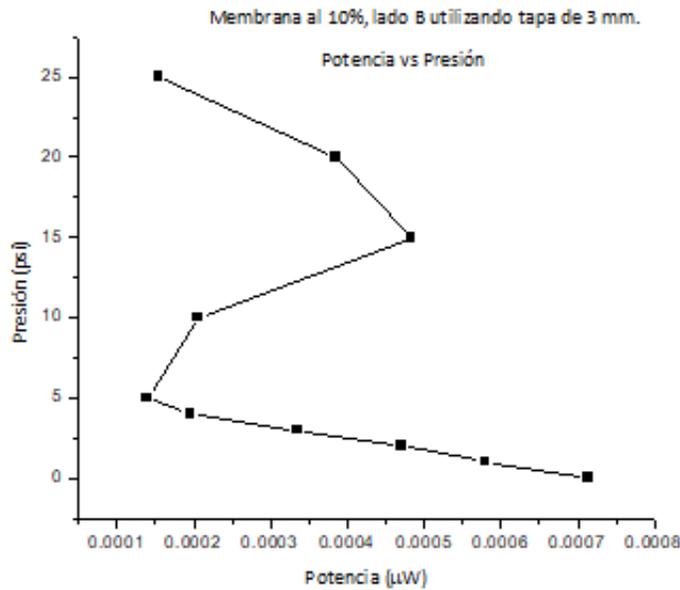
b) Rango de operación.



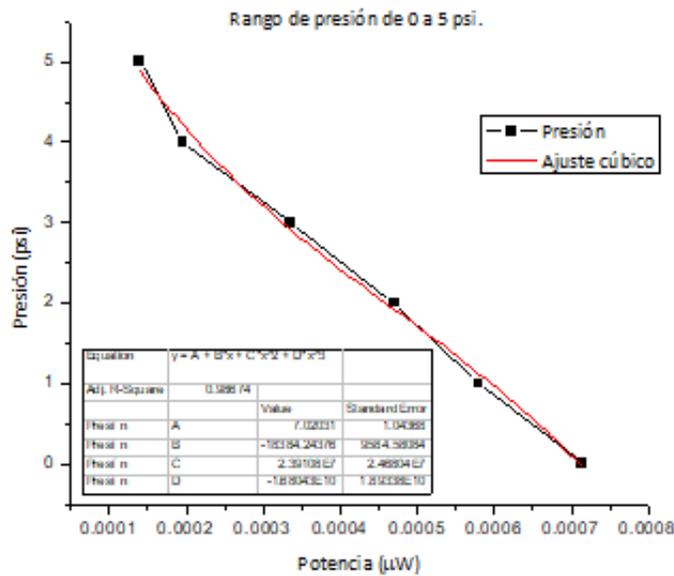
c) Rango de operación.

**Gráfica 4.18** a) Señal promedio, b) y c) Rangos de operación.

Para la membrana al 10% de catalizador lado A utilizando la tapa de 3 mm de espesor la señal promedio presenta dos rangos de operación, el primer rango es muy corto solo 2 psi aunque presenta una alta sensibilidad, mientras que en el segundo que abarca el rango de 3 a 25 psi presenta una sensibilidad menor.



a) Señal promedio.

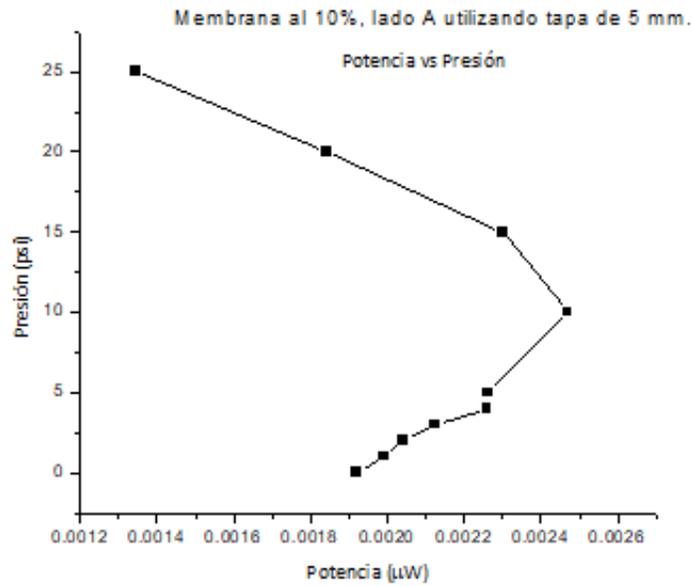


b) Rango de operación.

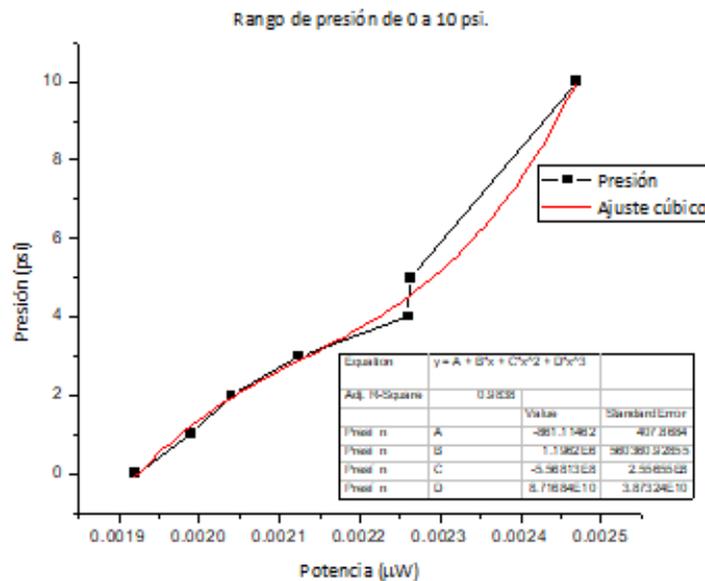
**Gráfica 4.19** a) Señal promedio, b) El rango de operación.

La señal promedio para la membrana al 10% lado B presenta tres posibles rangos de operación, de los cuales se desprecian los que están dentro del rango de 5 a 25 psi debido comportamiento de la potencia que presentan. Los

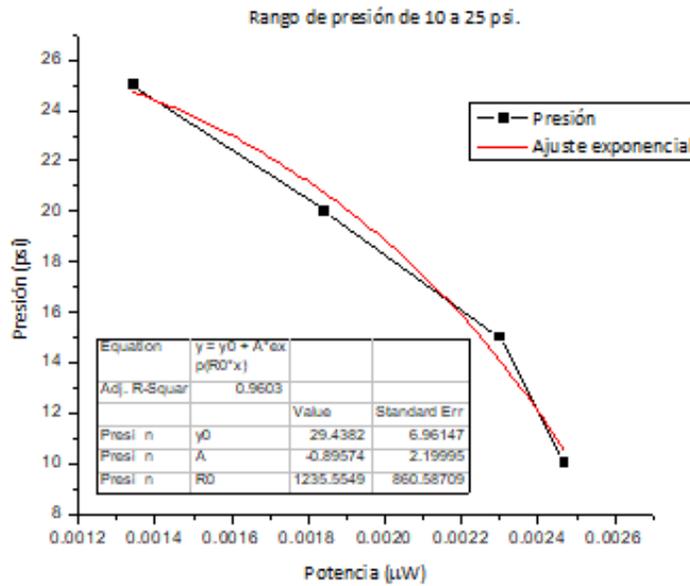
valores de potencia que maneja el rango de 0 a 5 son bajos pero debido a la sensibilidad que presenta permite a la membrana detectar rápidamente los cambios de presión.



a) Señal promedio.



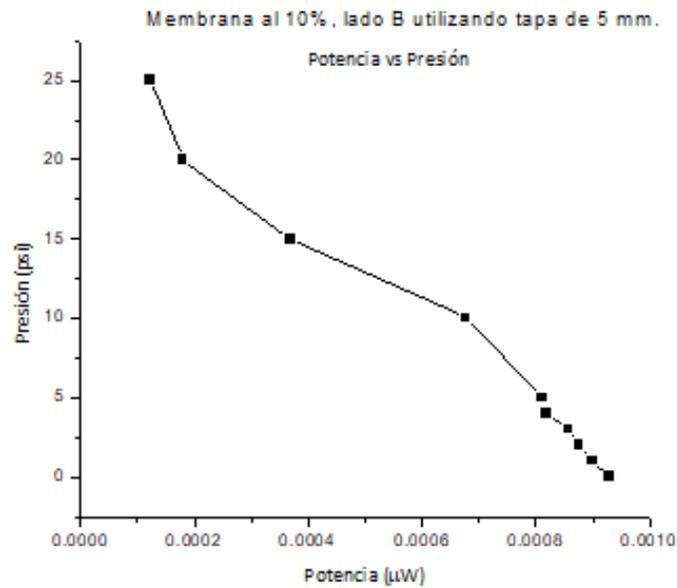
b) Rango de operación.



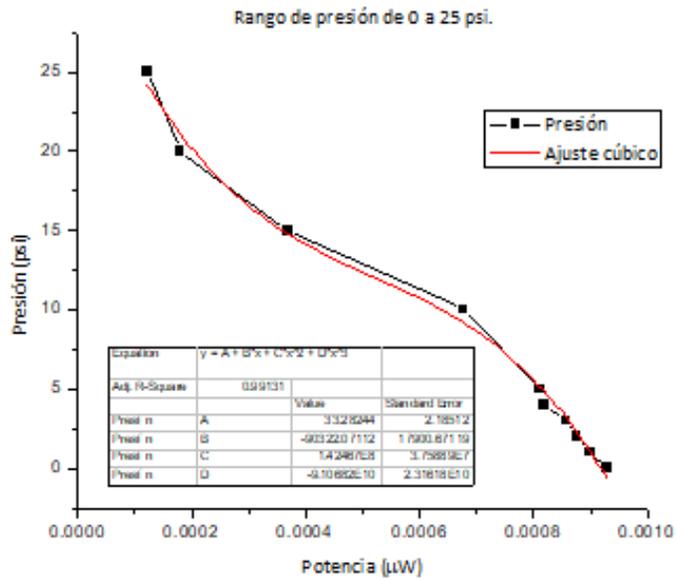
c) Rango de operación.

**Gráfica 4.20** a) Señal promedio, b) y c) Rangos de operación de la membrana.

La señal promedio indica dos posibles rangos de operación, presenta un aumento en la potencia dentro del rango de 0 a 10 psi, limitando el siguiente rango a los 25 psi en donde se aprecia una disminución de la potencia indicando una posible falla de la fibra dentro de la membrana aplicando presión por encima de los 25 psi ambos comportamientos indican una baja sensibilidad de la membrana.



a) Señal promedio.

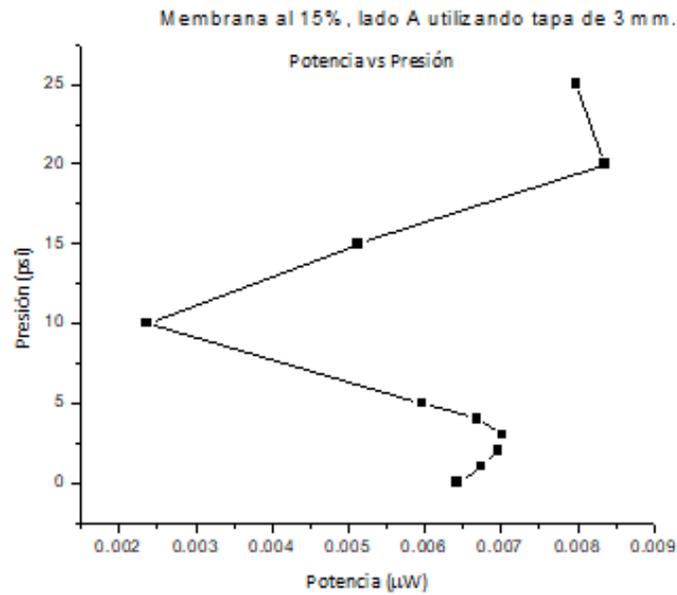


b) Rango de operación.

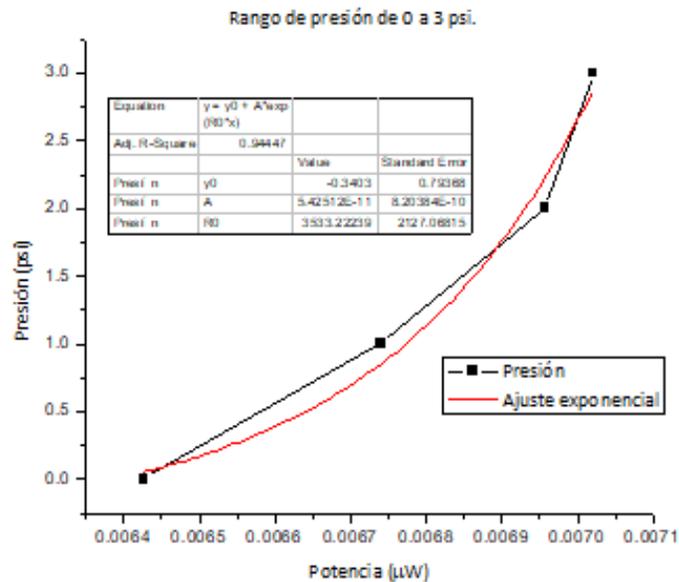
**Gráfica 4.21** a) Señal promedio, b) Rango de operación.

El lado B de la membrana al 10% tiene un mejor comportamiento a comparación del lado A, permitiendo tener un solo rango de operación de 0 a

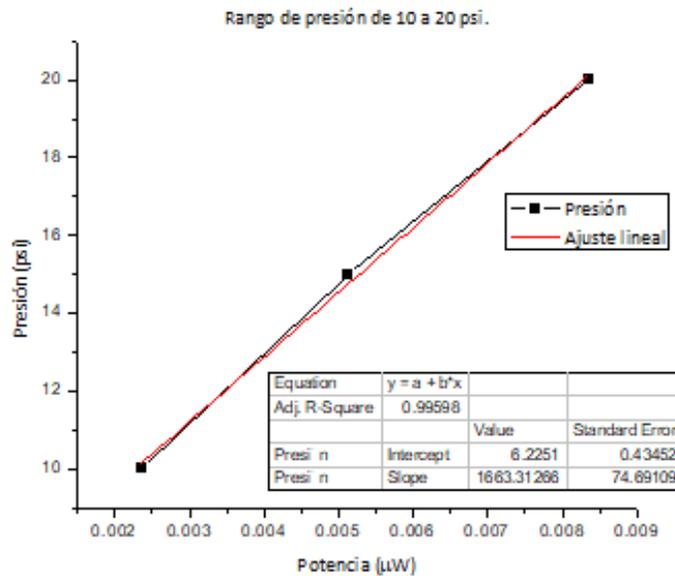
25 psi, aumentar la presión aplicada puede propiciar un fallo en la fibra debido a la disminución de potencia que presenta. La señal indica una sensibilidad similar a la que presenta el otro lado de la membrana.



a) Señal promedio.



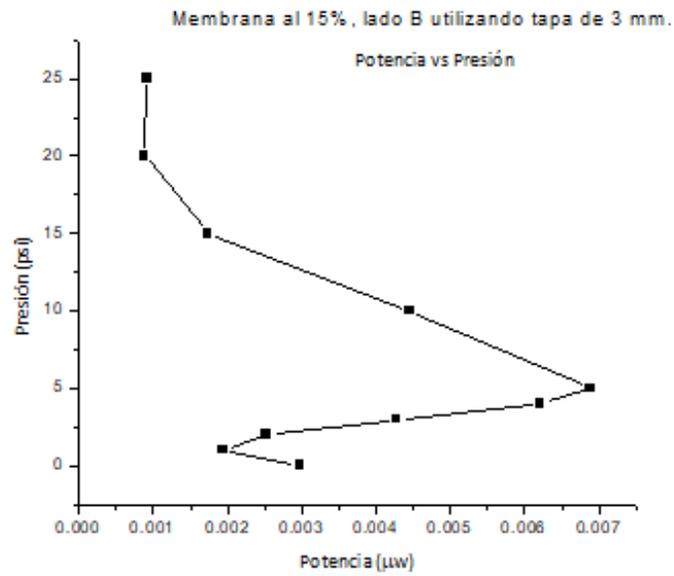
b) Rango de operación.



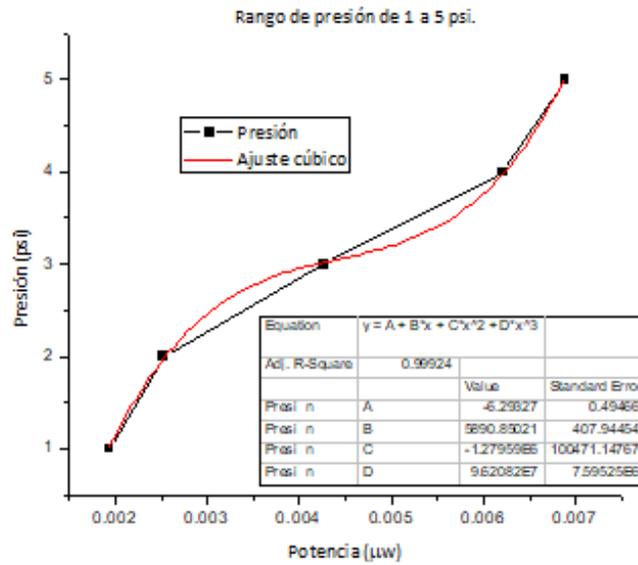
c) Rango de operación.

**Gráfica 4.22** a) Señal promedio, b) Rango de operación 0 a 3 psi, c) Rango de operación 10 a 20 psi.

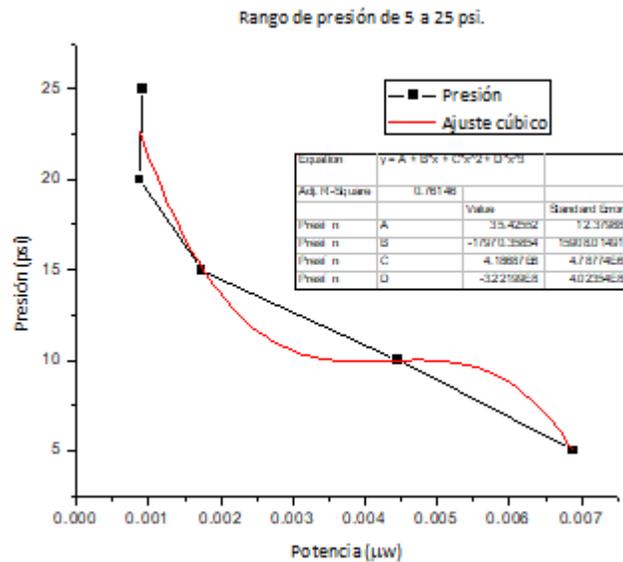
La membrana al 15% utilizando el lado A presenta hasta cuatro posibles rangos de operación, de los cuales solo se tomarán en cuenta los rangos de 0 a 3 psi y 10 a 20 psi, de los cuales el primero presenta una baja sensibilidad a comparación del segundo en el cual la sensibilidad es alta ante los cambios de presión que ocurren en la tapa.



a) Señal promedio.



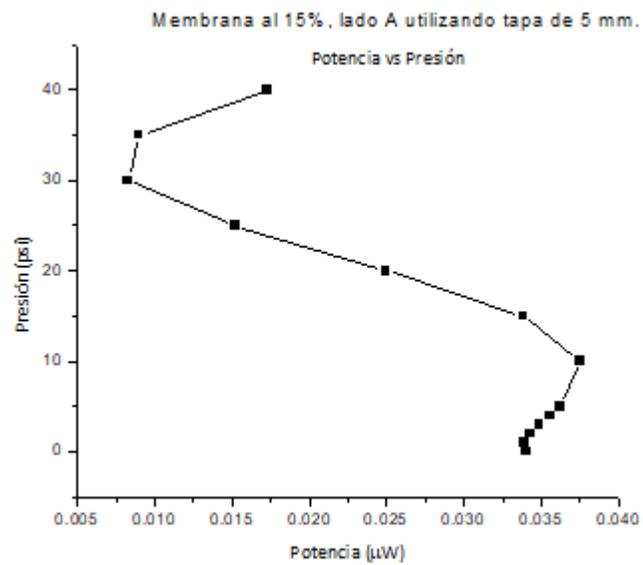
b) Rango de operación.



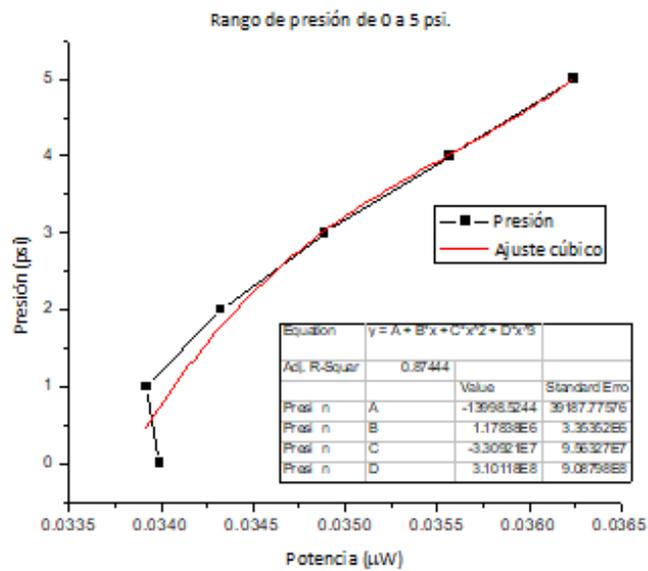
c) Rango de operación.

**Gráfica 4.23** a) Señal promedio, b) Rango de operación 1 a 5 psi, c) Rango de operación 5 a 25 psi.

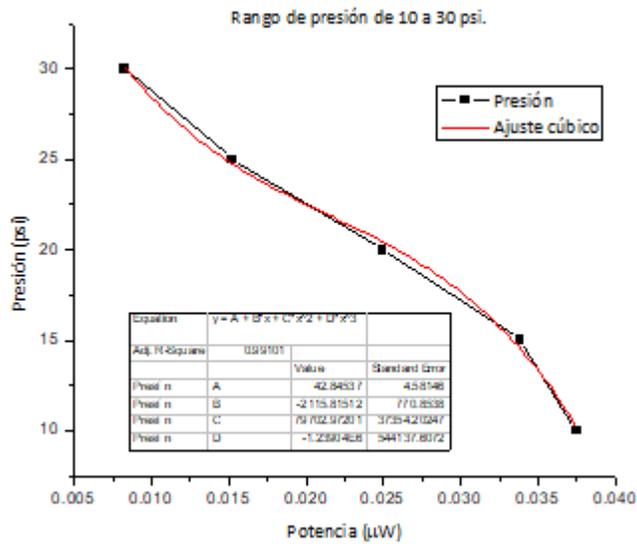
En este caso, la misma membrana ahora utilizando el lado B presenta tres posibles rangos de operación, de los cuales solo se tomarán en cuenta dos rangos de 1 a 5 psi y 5 a 25 psi, el rango de 0 a 1 psi se descarta debido al poco rango de trabajo; los rangos seleccionados presentan una baja sensibilidad ante los cambios de presión que ocurren en la tapa.



a) Señal promedio.



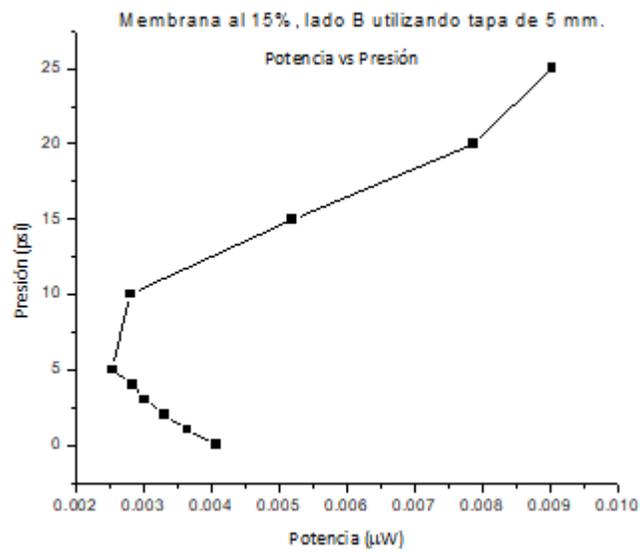
b) Rango de operación.



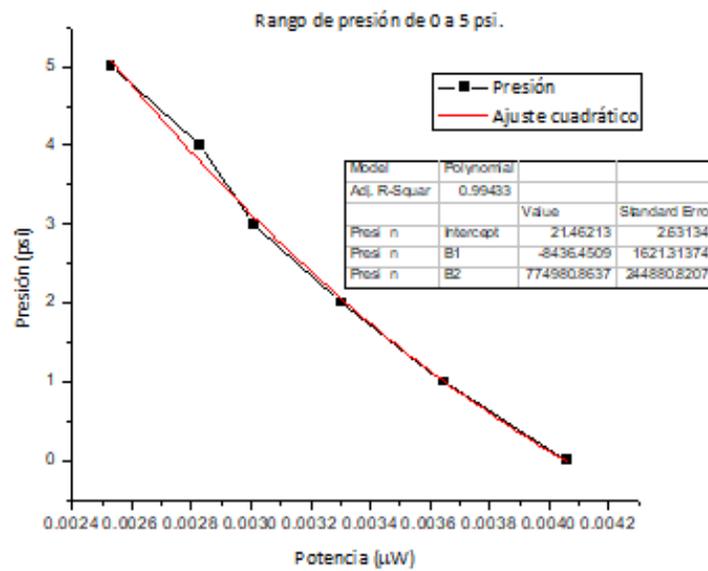
c) Rango de operación.

**Gráfica 4.24** a) Señal promedio, b) Rango de operación 0 a 5 psi, c) Rango de operación 10 a 30 psi.

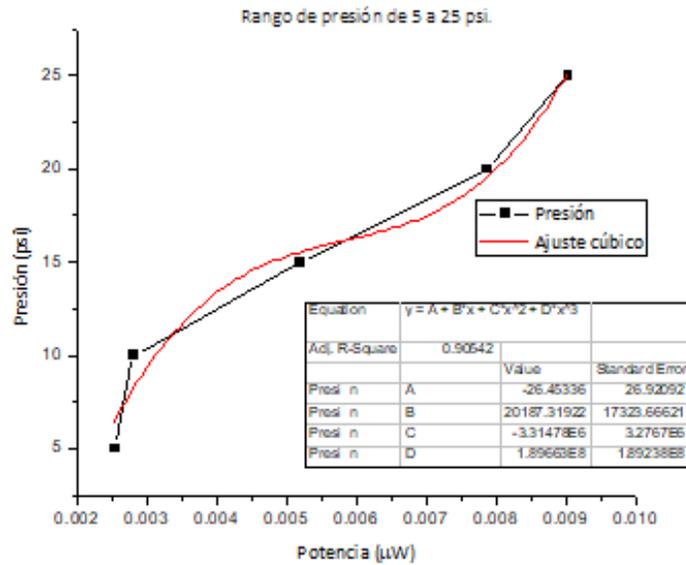
Para la membrana al 15% ahora lado A utilizando la tapa de 5 mm de espesor presenta tres posibles rangos de operación, de los cuales solo se tomarán en cuenta dos rangos de 0 a 5 psi y 10 a 30 psi, el rango de 5 a 10 psi se descarta debido al poco rango de trabajo; los rangos seleccionados presentan una baja sensibilidad ante los cambios de presión que ocurren en la tapa.



a) Señal promedio.



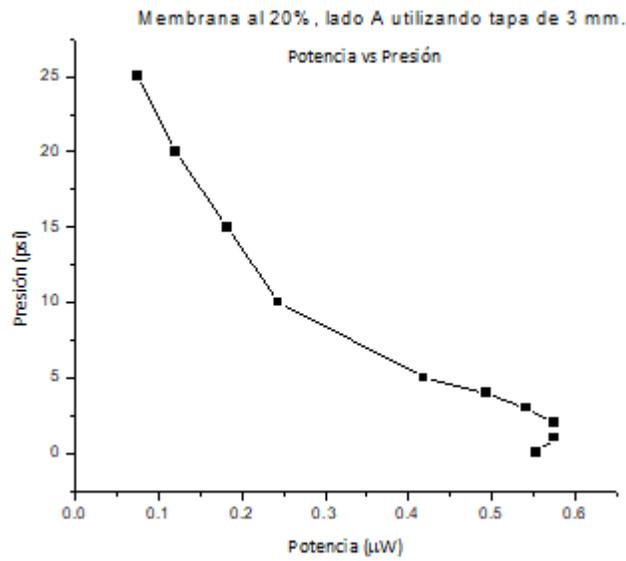
b) Rango de operación.



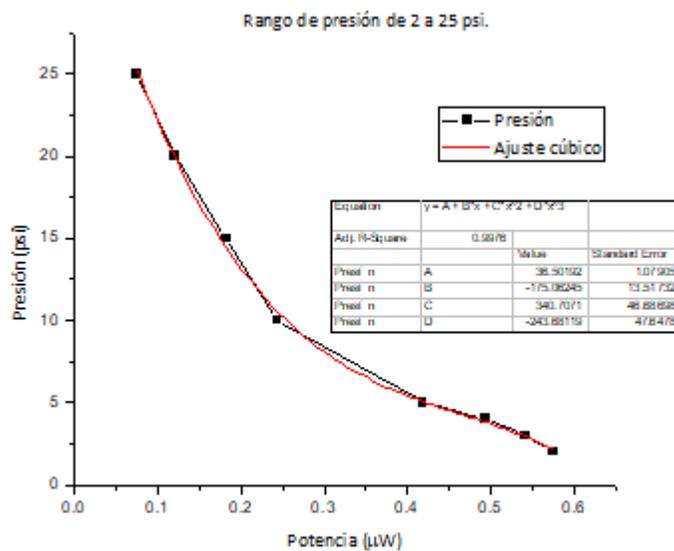
c) Rango de operación.

**Gráfica 4.25** a) Señal promedio, b) Rango de operación 0 a 5 psi, c) Rango de operación 5 a 25 psi.

Al realizar el cambio de tapa ahora por la de 5 mm de espesor se puede apreciar un cambio en el comportamiento de la señal, mientras que con la anterior tapa se podían apreciar tres rangos de operación, con la nueva tapa se reducen a dos. Mostrando una alta sensibilidad en el rango de 0 a 5 psi indicando que la membrana puede detectar cambios rápidos en los valores de presión.



a) Señal promedio.

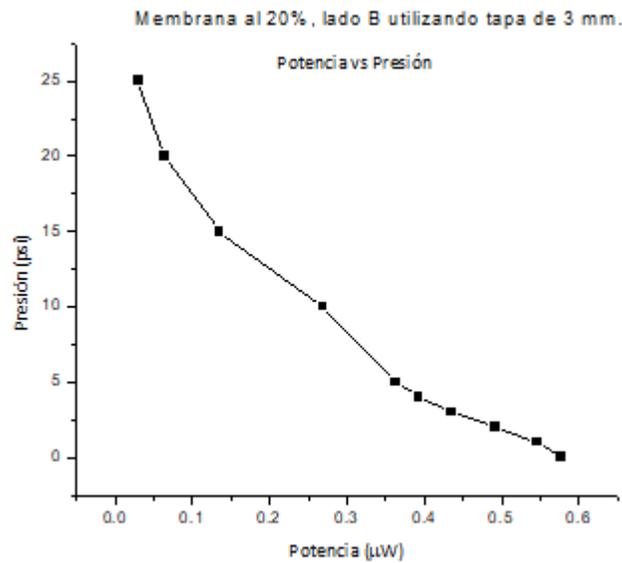


b) Rango de operación.

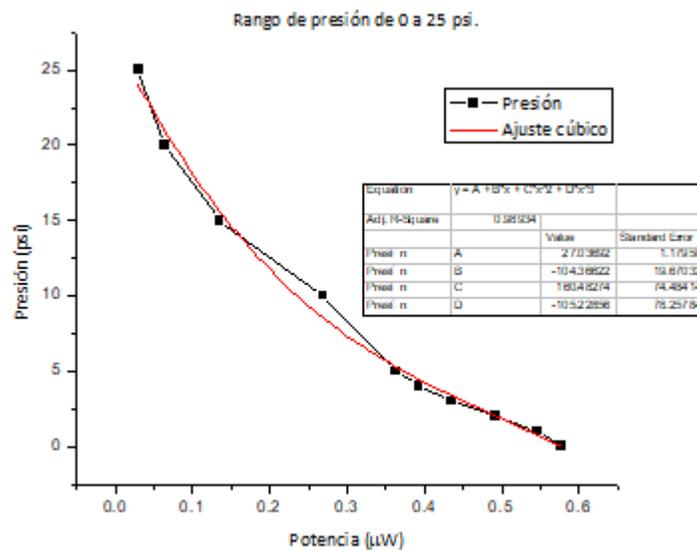
**Gráfica 4.26** a) Señal promedio, b) Rango de operación.

Utilizando la membrana más dura (relación 20% de catalizador), con la tapa de 3 mm de espesor se puede observar que se cuenta con dos rangos

operación, descartando el primero que abarca de 0 a 2 psi debido al pequeño rango de trabajo. Para el rango entre 2 y 25 psi se puede apreciar una sensibilidad baja que permite a la membrana reaccionar ante grandes cambios de presión en una tapa relativamente delgada.



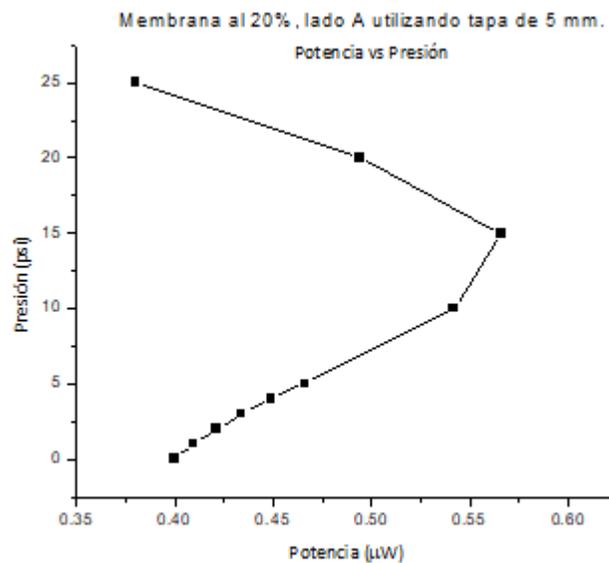
a) Señal promedio.



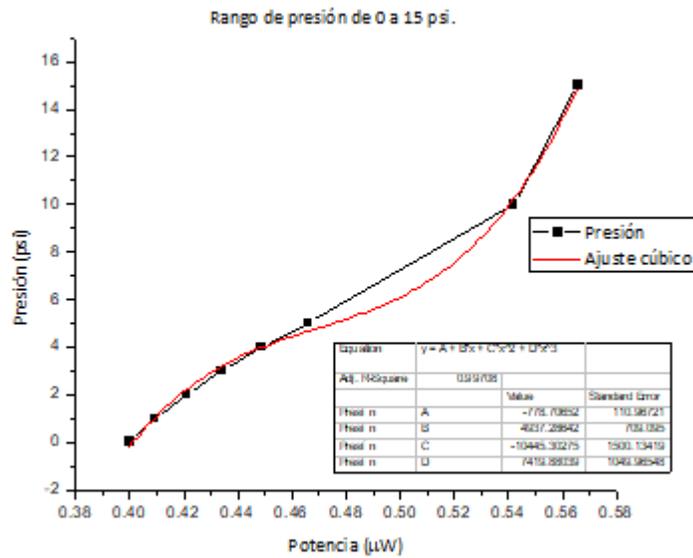
b) Rango de operación.

**Gráfica 4.27** a) Señal promedio, b) Rango de operación.

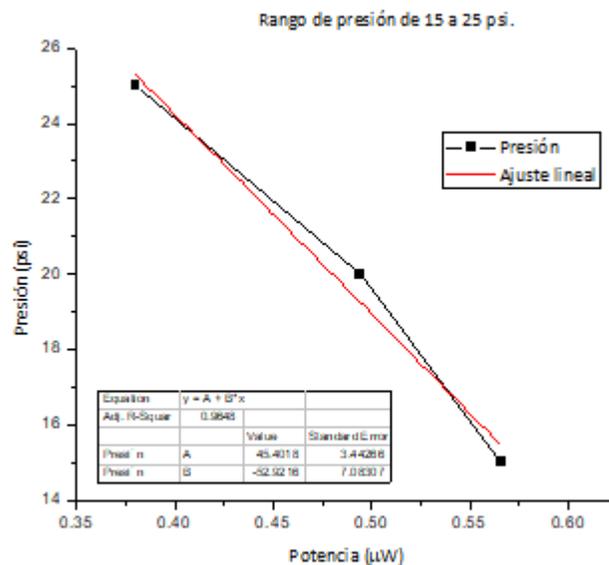
A comparación del lado A, el lado B permite tener un solo rango de operación que va de 0 hasta los 25 psi, aumentar el rango de presión puede ocasionar daño en la fibra debido a que la potencia es muy baja a los 25 psi. La sensibilidad que presenta este lado de la membrana es baja, la ventaja es el amplio rango de trabajo.



a) Señal promedio.



b) Rango de operación.

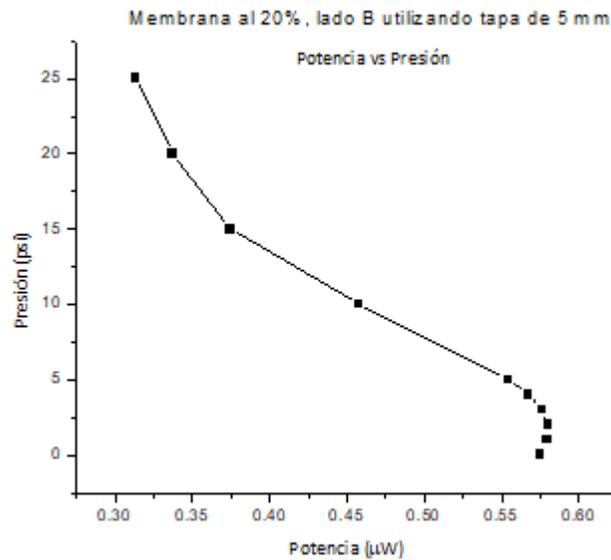


c) Rango de operación.

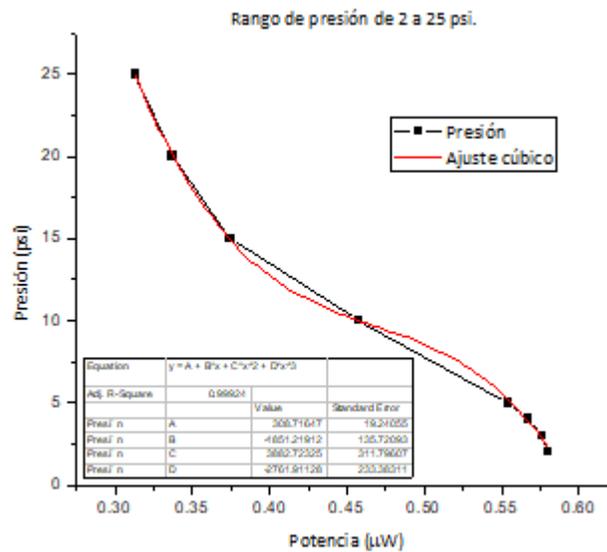
**Gráfica 4.28** a) Señal promedio, b) Rango de operación 0 a 15 psi, c) Rango de operación 15 a 25 psi.

El cambio en el espesor de la tapa presenta dos rangos de operación al igual que con la tapa delgada, la diferencia es que ahora los rangos se amplían,

presentando en el rango de 0 a 15 una menor sensibilidad a comparación del rango comprendido entre 15 a 25 psi.



a) Señal promedio.



b) Rango de operación.

**Gráfica 4.29** a) Señal promedio, b) Rango de operación es de 2 a 25 psi.

El cambio de lado continúa presentando dos posibles rangos de operación, se descarta el de 0 a 2 psi debido al corto rango de trabajo, en el rango de 2 a 25 psi se puede apreciar una sensibilidad no tan baja, lo cual indica que la membrana puede responder a los cambios de presión que se le aplican a la tapa de forma suave.

Terminadas las pruebas de potencia en las fibras dentro de las membranas se procede a realizar un concentrado de los resultados obtenidos (Tabla 4.3) de cada membrana por cada lado y en las dos diferentes tapas. También se realizó una inspección visual de ellas utilizando un microscopio, lo que motivó a realizar dicha prueba fue el cambio en los valores de potencia en los que en algunos casos aumentaba y disminuía a lo largo de la misma prueba; de las cuatro fibras se puede comprobar que la fibra F17 dentro de la membrana al 15% de catalizador sufrió fractura, lo que provoca que quede fuera de futuras pruebas.

**Tabla 4.3** Resultado de los valores obtenidos utilizando la fuente de luz y el diodo láser. La fibra sombreada (F17) resultó fracturada durante las pruebas de potencia.

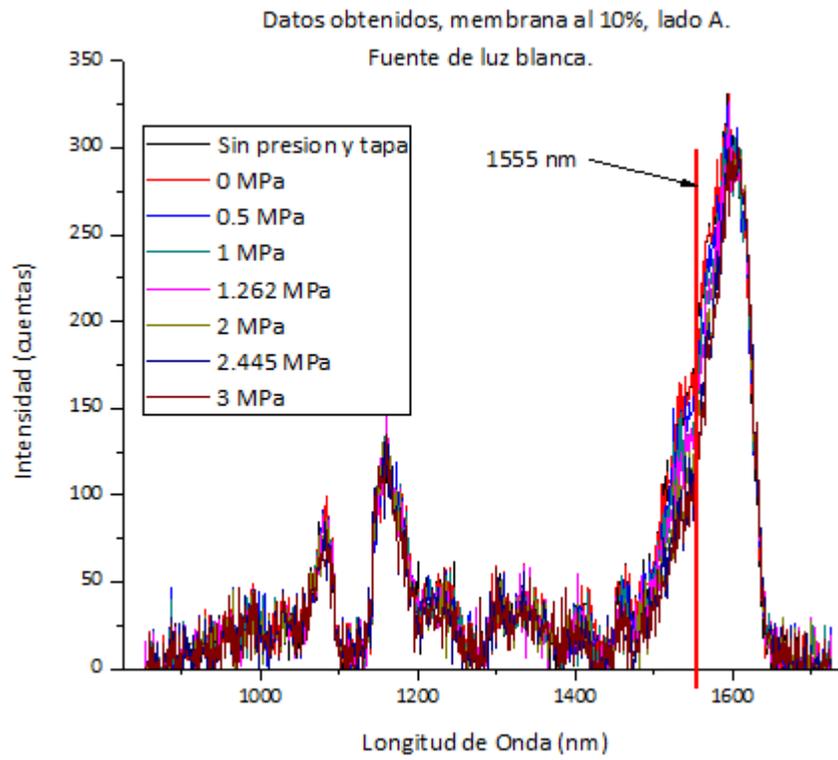
FIBRA	RELACION DE CATALIZADOR (%)	ESPESOR DE LA TAPA (mm)	LADO	RESULTADOS	
				FUENTE DE LUZ	DIODO LASER (1555 nm)
F15	5	3	A	OK.	OK, baja presión.
			B	OK.	Datos erróneos.
		5	A	Opera a 20 psi.	Opera a 15 psi.

			B	OK.	Limite 30 psi.
F16	10	3	A	OK.	Limite 30 psi.
			B	Opera 0 a 10 psi.	Opera a 5 psi.
		5	A	OK.	Limite 30 psi.
			B	OK, pero la señal es baja.	OK.
F17	15	3	A	Irregular, rango de 0 a 5 psi.	Opera a 3 rangos.
			B	Irregular.	Opera a 2 rangos.
		5	A	Ok, pero la señal es baja.	Opera a 2 rangos.
			B	Irregular.	OK.
F18	20	3	A	OK.	Opera de 2 a 30 psi.
			B	OK.	Opera de 0 a 30 psi.
		5	A	Opera alta – baja presión.	Opera 2 rangos.
			B	Opera alta – baja presión.	Opera de 2 a 30 psi.

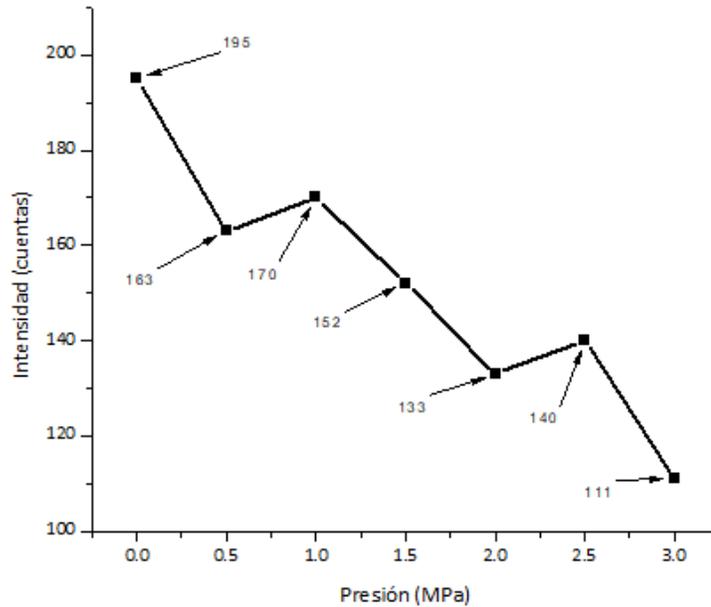
Con lo anterior se puede concluir que la membrana al 5% queda limitada solo a trabajar con el lado A presentando dos rangos de operación en ambas tapas, el lado B debido a su comportamiento errático en los valores de potencia queda descartado. La membrana al 10% de catalizador llega a presentar hasta dos rangos de operación en ambos lados, pero el mejor resultado es utilizando el lado B en la tapa de 5 mm de espesor. La membrana al 20% utilizando el lado B y la tapa de 3 mm tiene un solo rango de operación mientras que con los restantes presenta dos rangos de operación en los que se puede llegar a apreciar que la parte inicial no es muy confiable. Se selecciona la fibra F16 con la membrana al 10% de catalizador, debido a los valores que se pueden llegar a perder en los rangos inferiores utilizando una membrana al 20% de catalizador (dura).

#### **4.6 PRUEBAS CON MOLDE INOX A 3 MPa**

Teniendo el arreglo experimental montado en el laboratorio, se realizan las mismas pruebas intercambiando el molde de Nylamid por el molde propuesto de acero inoxidable, al realizar el cambio en los moldes también se cambiará las unidades de medición: de psi a MPa debido a que se requiere de mayor presión para deformar el acero inoxidable. A continuación, se muestran los resultados obtenidos con la membrana al 10% de catalizador con la fibra F16 que es la que presentó mejor comportamiento con el molde de Nylamid. Primero se presenta el perfil de la fibra dentro de la membrana lado A con valores de intensidad utilizando una fuente de luz (Gráfica 4.29), posteriormente se presentan los valores de intensidad a 1555 nm (Gráfica 4.30).

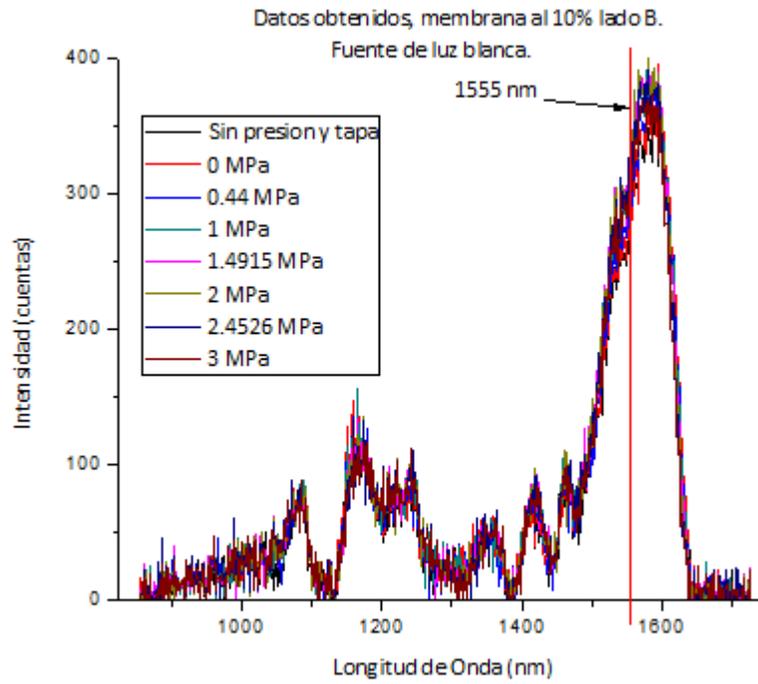


**Grafica 4.29** Valores de intensidad de la fibra F16 dentro de la membrana lado A.

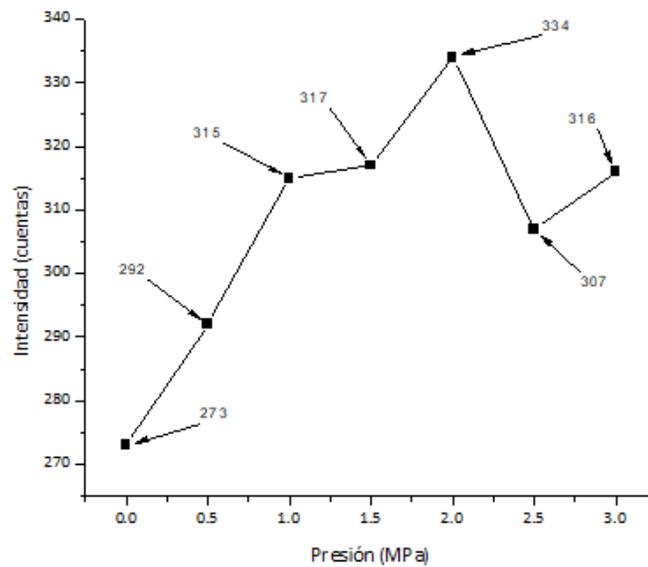


**Gráfica 4.30** Valores de intensidad a 1555 nm.

Con los valores de intensidad obtenidos de la fibra dentro de la membrana, se puede observar que los valores máximos para cada valor de presión aplicada se presentan cerca de los 1600 nm. La grafica anterior presenta los valores de intensidad obtenidos para cada valor de presión aplicada en 155nm. Los valores de intensidad máxima se encuentran en un rango entre 300 y 280 aproximadamente en la longitud de los 1600 nm; el rango de intensidades aplicando presión varía de 195 a 111 aplicando el mayor valor de presión. Los resultados para el lado B son los siguientes (Gráfica 4.31 y 4.32).



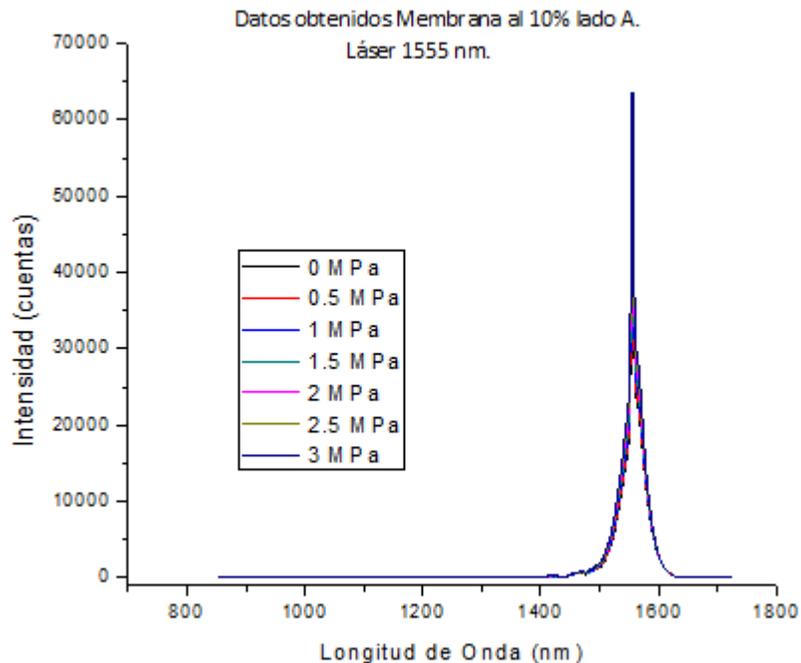
**Gráfica 4.31** Valores de intensidad de la fibra F16 dentro de la membrana lado B.



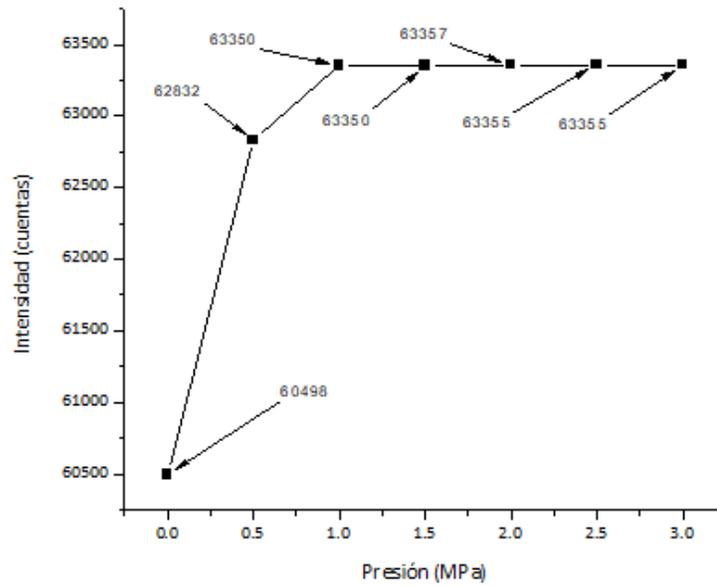
**Gráfica 4.32** Valores de intensidad a 1555 nm.

Similar a lo sucedido con el lado A, los valores máximos de intensidad se encuentran cerca de los 1600 nm. A diferencia del lado opuesto, en el comportamiento de los valores de intensidad se puede apreciar un cambio después de los 2 MPa, lo cual provoca que el rango de operación se acorte 1 MPa menos.

De nueva cuenta, se repiten las pruebas, pero ahora utilizando un diodo láser a 1555 nm. En primer lugar, se presentan los resultados del lado A (Gráfica 4.33 y Gráfica 4.34).



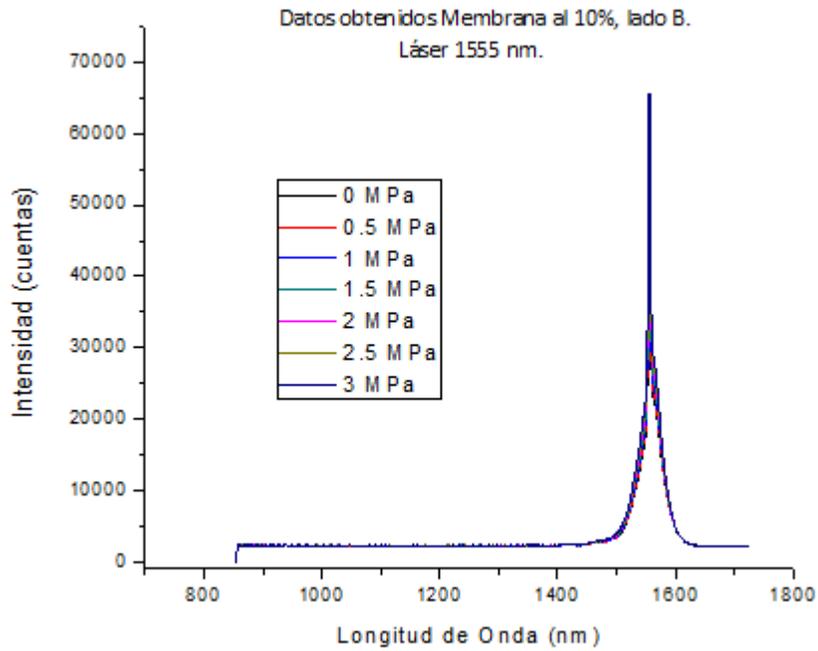
**Gráfica 4.33** Perfil de la fibra dentro de la membrana aplicando presión.



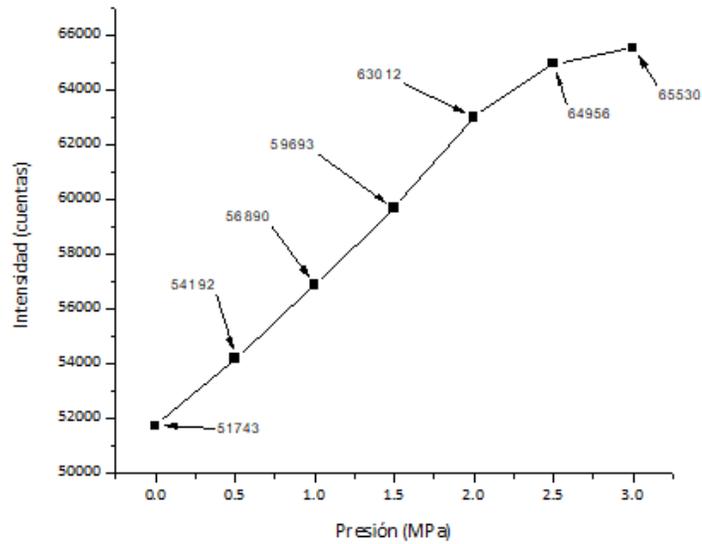
**Gráfica 4.34** Valores de intensidad a 1555 nm.

Al utilizar el diodo laser se puede observar que los valores de intensidad aumentan considerablemente, de la gráfica anterior, se observan dos rangos de operación, el primero que comprende de 0 a 1 MPa con una sensibilidad alta y el segundo con una baja sensibilidad abarcando de 1 a 3 MPa.

Los resultados obtenidos con la misma membrana del lado B se presentan en las siguientes graficas (Gráfica 4.35 y Gráfica 4.36).



**Gráfica 4.35** Perfil de la fibra dentro de la membrana aplicando presión.



**Gráfica 4.36** Valores de intensidad a 1555 nm.

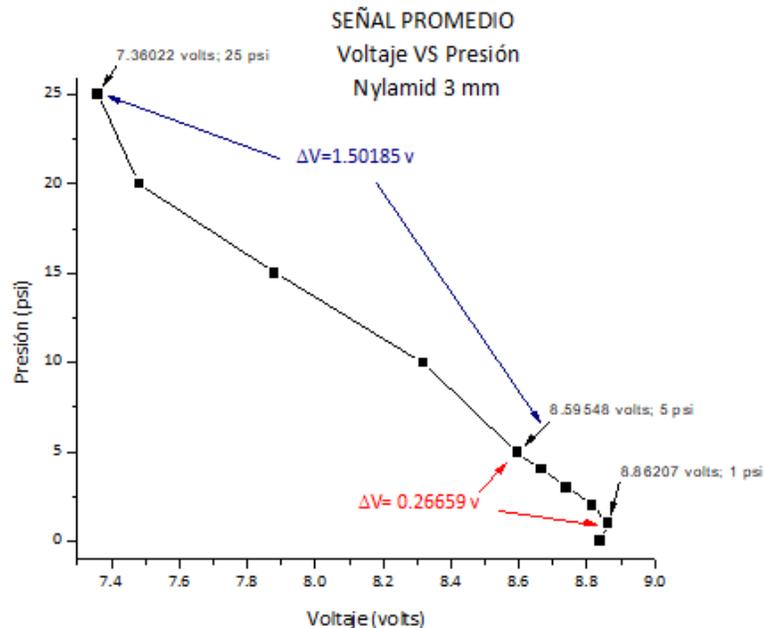
El comportamiento del lado B mejora comparándolo con el lado opuesto, presenta un solo rango de operación con una sensibilidad aceptable. Todo

indica que el comportamiento de las señales de intensidad cambia al aplicar ya sea la fuente de luz blanca o el diodo laser.

#### 4.7 VALORES DE VOLTAJE

Hasta ahora todos los valores obtenidos en las pruebas están en función de la intensidad o potencia. Para poder realizar pruebas en tiempo real se necesitan valores de voltaje, los cuales se obtendrán con ayuda del circuito amplificador (Sección 3.5.4). En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a la fibra F16 con la membrana al 10% en los moldes de Nylamid e Inox con tapa de 3 mm (Figura 3.40), ya que la tapa de 5 mm en el molde de Inox requiere una presión mayor a los 3 MPa.

La siguiente gráfica presenta los valores de voltaje obtenidos para el molde de Nylamid (Gráfica 4.37) y la membrana del lado A.

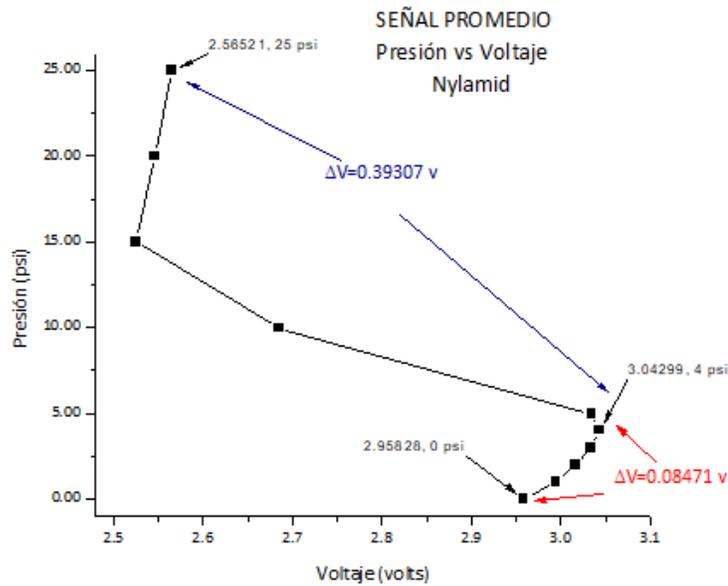


**Gráfica 4.37** Valores de voltaje para el molde de Nylamid.

La gráfica anterior presenta la señal promedio después de realizar 5 pruebas, con los datos obtenidos se puede apreciar que en el rango de “baja presión”

la fibra realiza un acomodo dentro de la membrana y posteriormente los valores de voltaje comienzan a disminuir al estar flexionándose en el interior. En el rango de 1 a 25 psi se tienen 1.77 V para poder trabajar y posteriormente relacionarlos con valores de presión.

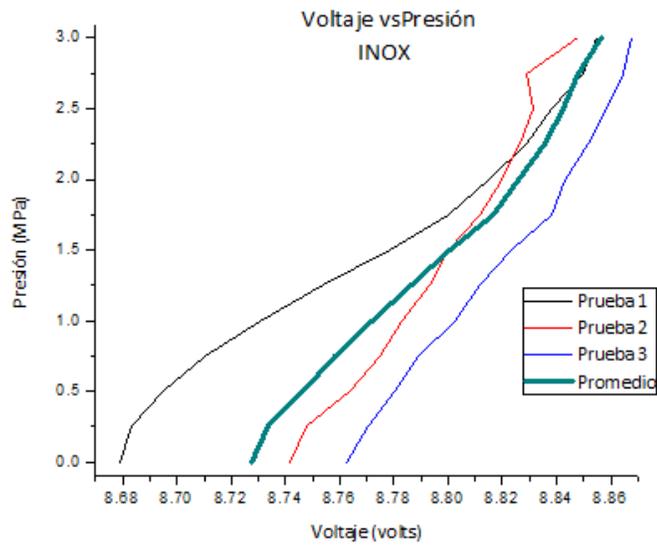
La siguiente gráfica muestra los valores de voltaje para el lado B (Gráfica 4.38).



**Gráfica 4.38** Valores de voltaje obtenidos con el molde de Nylamid.

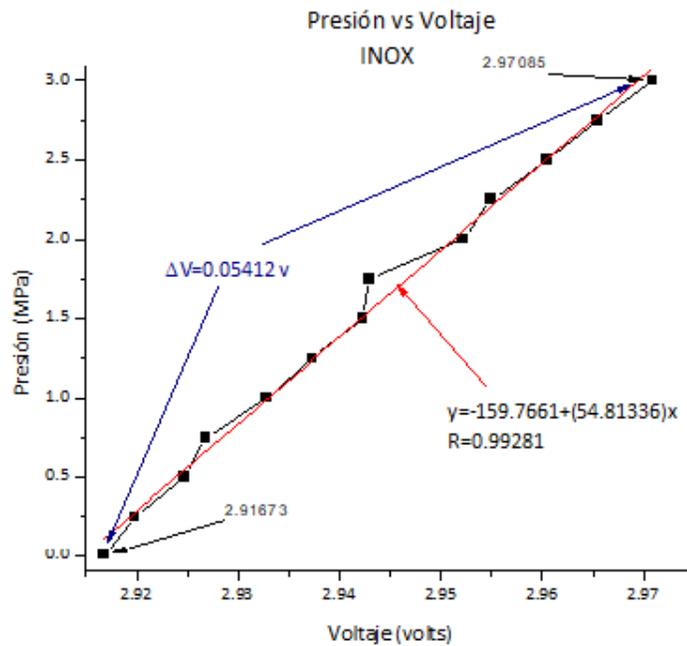
Con los resultados obtenidos para el lado B2, la gráfica proporciona dos rangos para medir la presión, el primero de 0 a 4 psi con una sensibilidad alta, en donde el voltaje es de 0.085 V; para el segundo, con una sensibilidad baja permite trabajar con 0.39 V.

Para el molde de acero inoxidable se obtienen los valores de voltaje utilizando el lado A (Gráfica 4.39), se observa un desfase entre prueba y prueba, y el comportamiento continúa presentándose. Por lo tanto, el lado A de la membrana está descartado para la medición de presión.



**Gráfica 4.39** Valores para el lado A en el molde de acero inoxidable.

Con el comportamiento del lado A, es de esperarse que continúe en el lado B. Caso contrario, el lado B tiene mejor comportamiento que en el Nylamid (Gráfica 4.40).



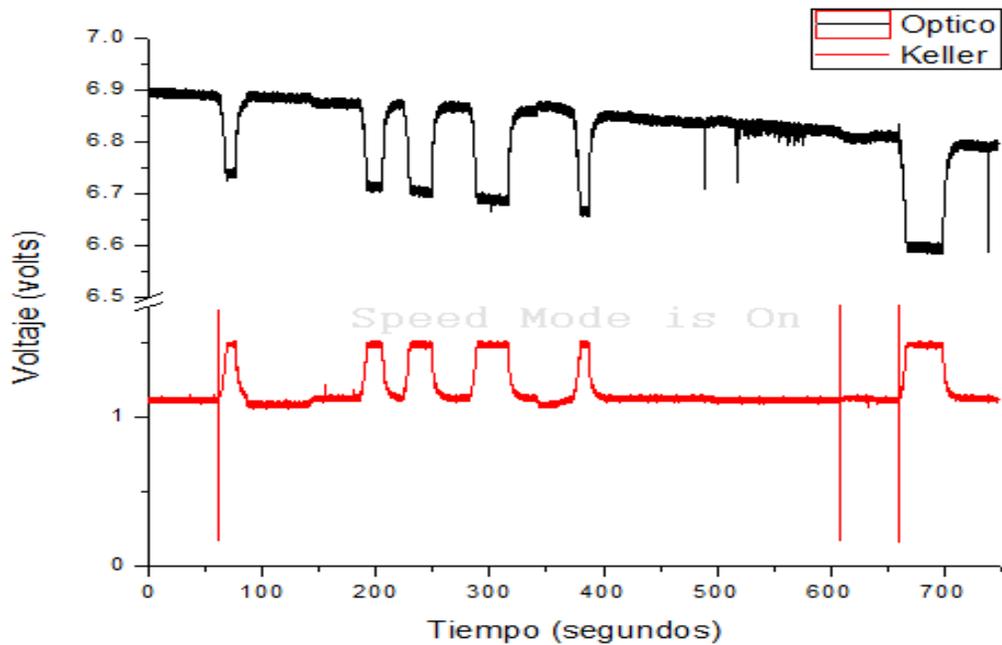
**Gráfica 4.40** Valores de voltaje para el lado B de la membrana.

El resultado de la señal promedio de las pruebas muestra una alta sensibilidad de la membrana a los cambios de presión aplicados al molde. A pesar de la alta sensibilidad, el rango de voltaje con el que se cuenta es reducido lo que representa que la tapa de 3 mm se deforma muy poco en los intervalos de presión.

Todas las pruebas anteriores hasta este momento nos llevan en la dirección correcta, proporcionando información acerca del comportamiento de los moldes y las tapas. En este punto, se puede determinar que el Nylamid es viable utilizarlo para rangos de presión bajos que vayan de 0 hasta 25 psi; por otro lado, el inoxidable nos permite trabajar con valores de presión dentro del rango de 0 a 3 MPa. Es importante mencionar en este punto que el rango de 3 MPa es el objetivo a alcanzar para poder utilizar la membrana en un banco de prueba, el cual, a continuación, se describe.

#### **4.8 PRUEBAS EN EL GOLPE DE ARIETE**

Con el arreglo instalado en el golpe de ariete (Figura 3.41) y utilizando la fibra F16 con la membrana al 10% lado B, se realizan las pruebas obteniendo valores de voltaje tanto para el sensor óptico y el sensor comercial (ver Apéndice). La siguiente gráfica (Gráfica 4.41) presenta los valores de voltaje para los dos sensores durante una prueba.



**Gráfica 4.41** Comportamiento de voltaje de ambos sensores.

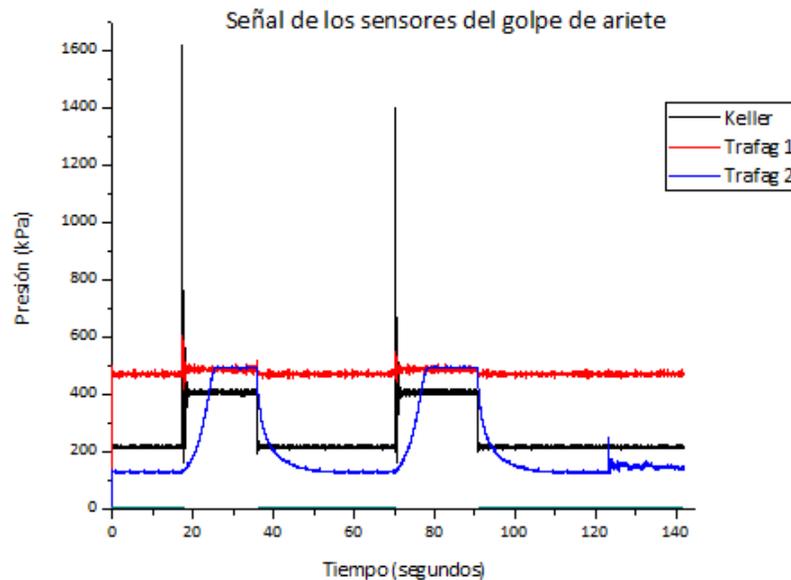
El comportamiento es inverso entre los dos sensores; cuando el sensor comercial alcanza un máximo de voltaje, el sensor óptico alcanza un mínimo y viceversa; estos aumentos de voltaje en el sensor comercial se deben a que hay un cierre completo de la llave en el golpe de ariete<sup>4</sup>. También se aprecia como la señal del sensor óptico no es estable, conforme avanza la prueba la señal va disminuyendo, pero el comportamiento se mantiene.

Los valores de voltaje en el sensor óptico se mantienen con la misma tendencia luego de realizar repeticiones de las pruebas con el golpe de ariete. A comparación del comportamiento de la membrana y la fibra en la medición de la potencia (Gráfica 4.40) estos nuevos valores van en sentido contrario. Este hecho se atribuye a que la tapa que sujeta la membrana a la tapa del cuerpo del sensor (Figura 3.41) mostrada en el capítulo anterior está en constante movimiento, esto es, al desarmar todo el sensor para hacer la

<sup>4</sup> Valores obtenidos con un caudal de 8.4 l/min

comparación con el sensor comercial y de nuevo volver a colocar todo en su lugar, la tapa presiona de más a la membrana haciendo que la curvatura de la fibra se desplace y ahora en lugar de que se tengan valores de voltaje de menos a más como era el comportamiento original, la fibra transmite valores en forma invertida.

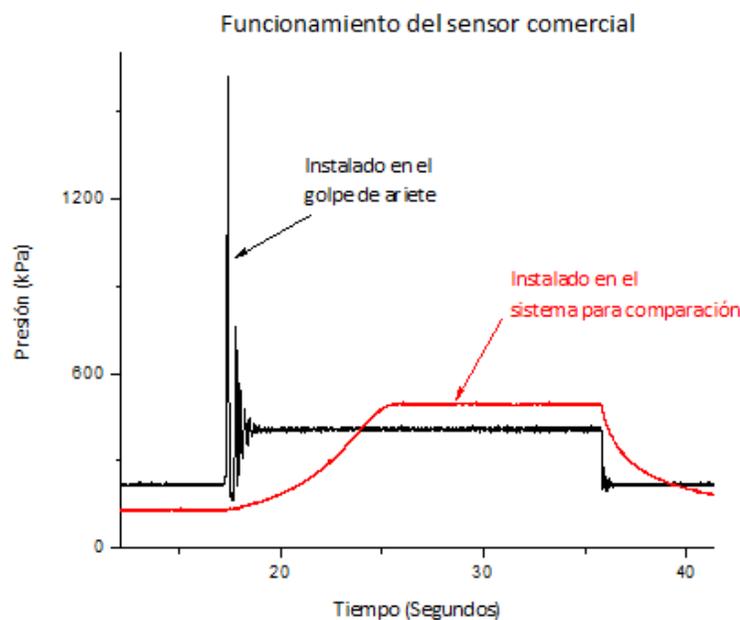
Teniendo en cuenta el nuevo comportamiento de la señal del sensor óptico; es importante para pruebas futuras el comportamiento del sensor comercial (Keller), para asegurarse del buen funcionamiento y descartar cualquier mal funcionamiento se conecta este último en el golpe de ariete junto con otros dos sensores comerciales más de la marca Trafag (Gráfica 4.42). Haciendo hincapié en el sensor Keller, el cual es el sensor con el que se comparará el sensor óptico.



**Gráfica 4.42** Comportamiento de los diferentes sensores colocados en el golpe de ariete.

En la gráfica anterior se pueden observar los sensores Keller y Trafag 1, que al cerrar la válvula de paso en el golpe de ariete existe una perturbación,

después de determinado tiempo se estabilizan y así sucesivamente cada que existe un cierre completo de la válvula. Para el sensor Trafag 2 utilizado se observa que las perturbaciones desaparecen y los cambios se presentan en un aumento paulatino entre el valor mínimo y máximo. A continuación, se presenta una gráfica (Gráfica 4.43) donde se compara el comportamiento del sensor comercial (Keller) conectado en el golpe de ariete y conectado junto con el sensor óptico.

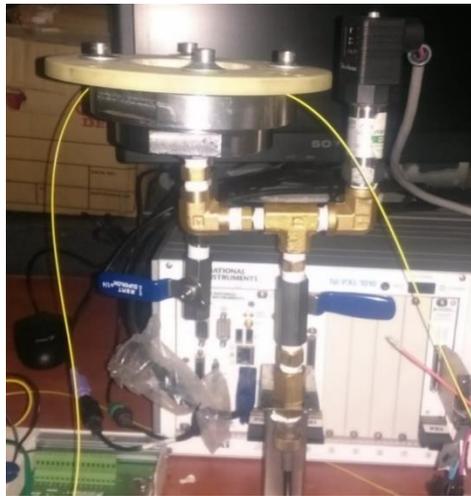


**Gráfica 4.43** Comparación del sensor comercial.

Se observa una clara diferencia entre el estar conectado solo y conectado junto al sensor óptico. Determinando que el cambio en el comportamiento del sensor comercial se debe a que existe aire en el sistema, por lo tanto, se revisa la salida del sensor óptico y se procede a llenar el sensor óptico antes de ser utilizado en las pruebas (Figura 4.26).



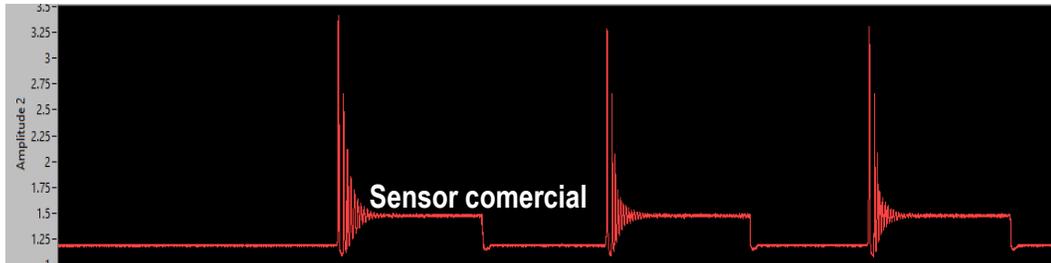
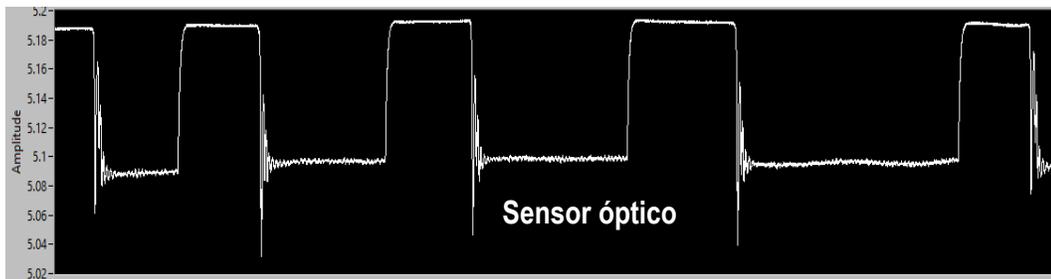
a)



b)

**Figura 4.26** a) El cuerpo del sensor óptico es llenado de agua antes de comenzar las pruebas en el golpe de ariete, b) Una vez llenado, se conecta junto con el sensor comercial en el golpe de ariete.

Antes de conectar ambos sensores al golpe de ariete por medio de la conexión en “Y”, se conecta uno a la vez directamente al golpe de ariete para asegurarse de su correcto funcionamiento, esto quiere decir, que al momento del cierre de la válvula las perturbaciones se presentan (Figura 4.27).



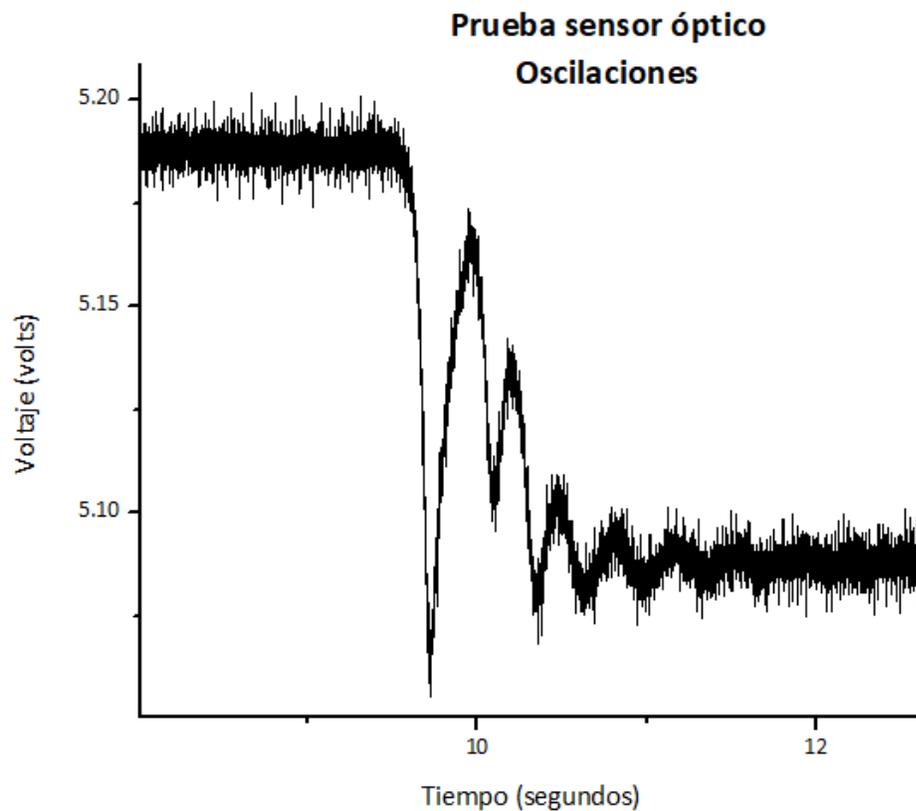
**Figura 4.27** Comportamiento por separado de los sensores.

Una vez conectados por separado, el funcionamiento es el esperado, el siguiente paso es conectar ambos sensores al mismo tiempo en el golpe de ariete utilizando la conexión “Y”. La siguiente figura muestra el comportamiento de los sensores después del ajuste de llenado previo (Figura 4.28).

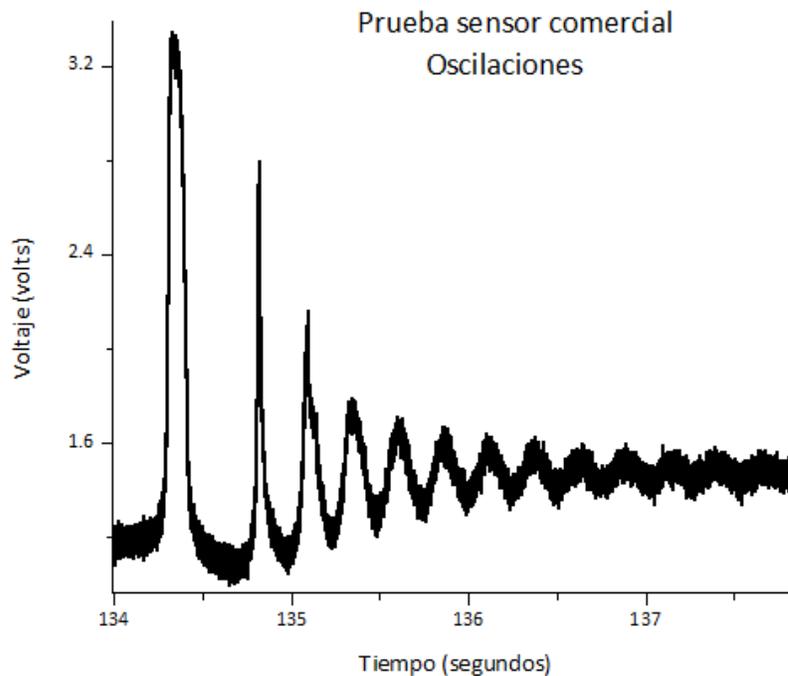


**Figura 4.28** Comportamiento de las señales.

Al realizar las pruebas para asegurar que el comportamiento de ambos sensores sea el correcto se comprueba que así es. El siguiente punto es en enfocarse en el área de las perturbaciones que se presentan en ambos sensores al realizar los cierres en la válvula y comprobar que tan similares son. Estas perturbaciones u oscilaciones pueden ser de mucha ayuda en el estudio de pruebas de eficiencia en sistemas hidráulicos (Gráfica 4.44 y Gráfica 4.45).



**Grafica 4.44** Oscilaciones que presenta el sensor óptico.



**Gráfica 4.45** Oscilaciones que presenta el sensor comercial.

La respuesta a las perturbaciones en ambos sensores es visible, las cuales se comportan como oscilaciones amortiguadas en ambos casos: sensor óptico (gráfica 4.44) y sensor comercial (gráfica 4.45) se presenta una prueba de cierre de válvula que dura alrededor de 4 segundos. En cuanto al número de perturbaciones que se pueden apreciar en cada sensor, para el óptico se pueden apreciar alrededor de 6 antes de que la señal se estabilice y para el sensor comercial se aprecian alrededor de 8 perturbaciones antes de que la señal se estabilice. Tomando como referencia el lapso de un segundo se pueden apreciar 4 perturbaciones en el sensor óptico mientras que en el comercial en el mismo lapso de tiempo se aprecian 5 perturbaciones. Por último, en cuanto a la respuesta que presentan los sensores, se puede apreciar que en el sensor óptico la respuesta es más amortiguada que en el sensor comercial, ya que el número de perturbaciones antes de que la señal se estabilice es menor.

#### **4.9 CALIBRACION DEL SENSOR OPTICO**

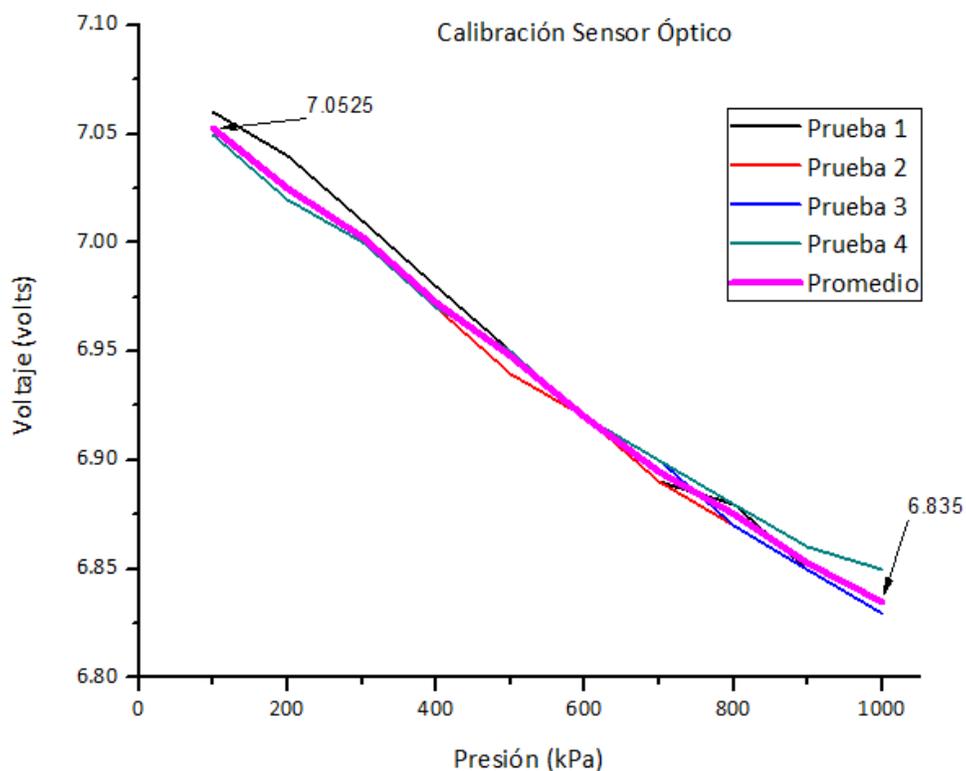
Considerando el resultado de las pruebas anteriores, se procede a realizar una calibración del sensor óptico en espera de mejorar la respuesta. Los rangos de presión varían de 0 a 1000 kPa, con intervalos de 100 kPa y regresando a 0. Se realizan 4 pruebas y se obtiene un promedio. Los resultados de la calibración se presentan en la Tabla 4.4. Para cada prueba se obtiene un valor de voltaje sin presión, después se ejerce presión en el sensor y de nueva cuenta se regresa a cero, en la columna “sin presión” se espera obtener el mismo voltaje con el que se inició la calibración sin presión dentro del sensor.

El voltaje de inicio es de 7.07 volts con una variación de 0.001 volt. La diferencia para la primera prueba entre el inicio y final de la misma es de 0.024 volts, para las pruebas 2 y 3 la diferencia es de 0.023 volts y para la última prueba fue de 0.02 volts.

**Tabla 4.4** Valores de voltaje para el sensor óptico obtenidos en la calibración (0 a 1000 kPa).

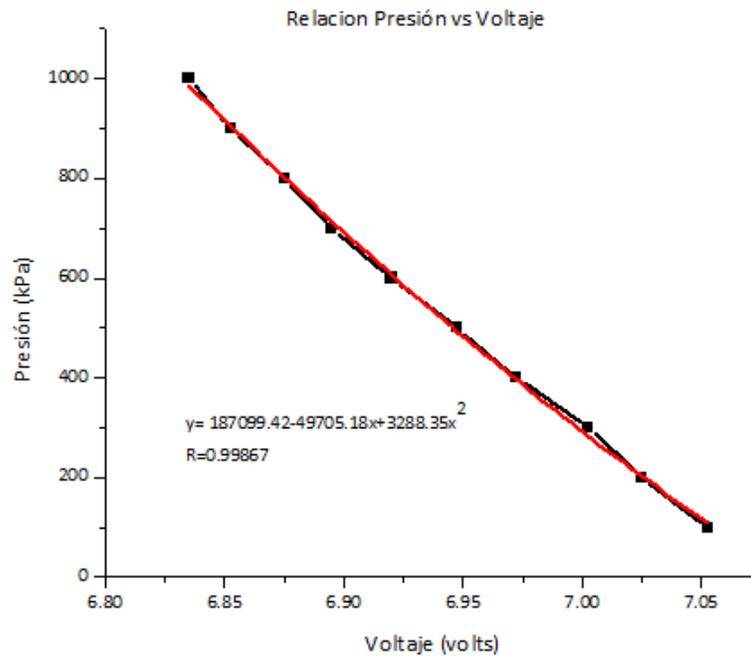
		<b>Voltaje Sensor Óptico</b>							
Balanza (kPa)	P1 (volts)		P2 (volts)		P3 (volts)		P4 (volts)		
	Sin presión	Valor inicial 7.07	Sin presión	Valor inicial 7.06	Sin presión	Valor inicial 7.06	Sin presión	Valor inicial 7.06	
100	7.07	7.06	7.06	7.05	7.06	7.05	7.06	7.05	
200	7.06	7.04	7.06	7.02	7.06	7.02	7.06	7.02	
300	7.06	7.01	7.06	7.00	7.06	7.00	7.06	7.00	
400	7.06	6.98	7.06	6.97	7.06	6.97	7.06	6.97	
500	7.06	6.95	7.06	6.94	7.06	6.95	7.06	6.95	
600	7.06	6.92	7.06	6.92	7.06	6.92	7.06	6.92	
700	7.06	6.89	7.06	6.89	7.06	6.9	7.06	6.9	
800	7.06	6.88	7.06	6.87	7.06	6.87	7.06	6.88	
900	7.06	6.85	7.06	6.85	7.06	6.85	7.06	6.86	
1000	7.06	6.83	7.06	6.83	7.06	6.83	7.06	6.85	

Con los valores obtenidos en las pruebas anteriores, se realiza un promedio de los datos (Gráfica 4.46), teniendo un valor inicial de 7.0525 volts para 0 kPa de presión y un valor de 6.835 volts cuando se aplican 1000 kPa de presión.



**Gráfica 4.46** Valores obtenidos en la calibración del sensor óptico.

El siguiente paso es establecer la relación entre la presión aplicada y el voltaje que proviene del sensor óptico, una vez hecha, la relación permitirá que el programa en LabView proporcione valores de presión para poder mostrar datos en valores de presión (kPa) y también poder compararlo con el sensor comercial (Gráfica 4.47).



**Gráfica 4.47** Función obtenida de la relación de la presión aplicada y el voltaje obtenido.

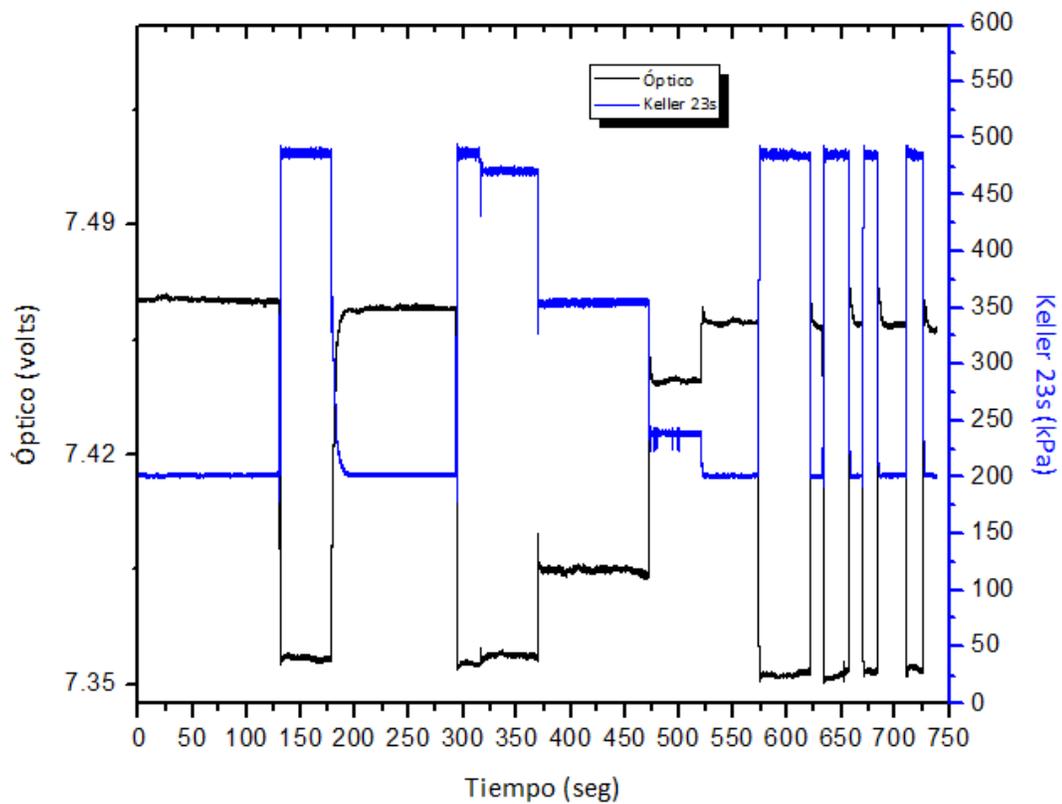
#### 4.9.1 PRUEBAS DE COMPARACION EN LA BALANZA DE PESO

##### MUERTO

En las pruebas de comparación, se encuentran conectados simultáneamente tanto el sensor comercial y el sensor óptico en la conexión de la balanza de peso muerto con ayuda de una conexión en “Y” (Figura 4.29). Como resultado, se observa que las señales responden al mismo tiempo ante los cambios de presión que se presentan dentro de la tubería del golpe de ariete mas no de igual manera, conservando el comportamiento inverso de las señales (Gráfica 4.48) y mostrando para el sensor óptico valores de voltaje mientras que para el sensor comercial se presentan valores de presión.



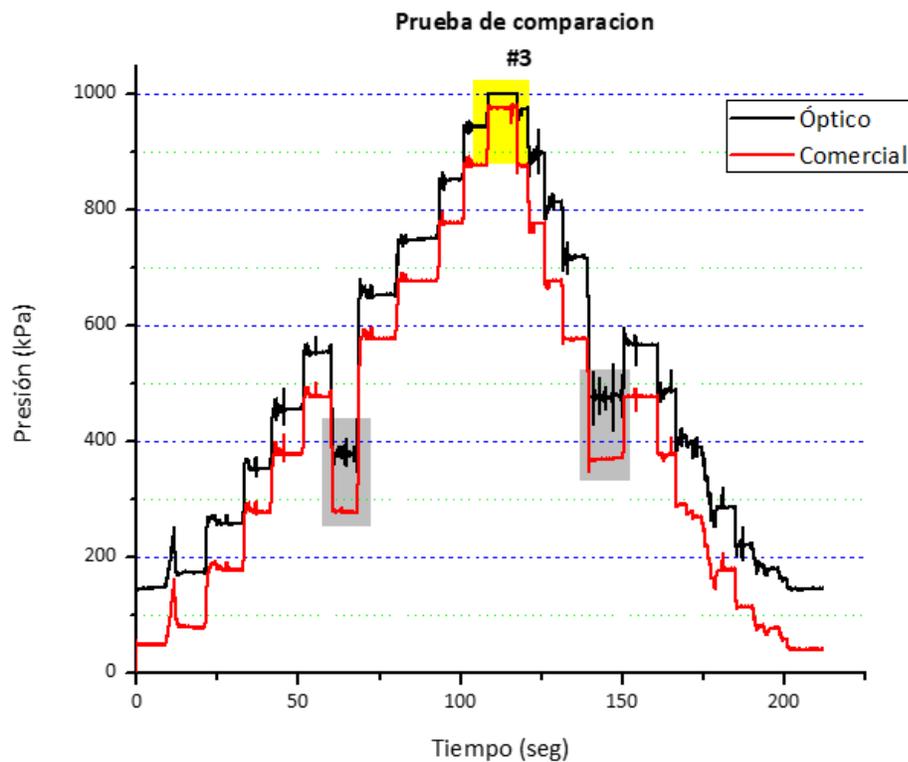
**Figura 4.29** Conexión de los sensores a la balanza de peso muerto.



**Grafica 4.48** Respuesta de los sensores ante los cambios de presión, sensor óptico en voltaje (negro) y sensor comercial (azul).

Es turno de repetir la prueba de comparación dentro de un ambiente controlado como es una balanza de peso muerto, en donde se puede controlar la presión dentro del sistema.

Se realizan cinco pruebas de comparación, de las cuales, la que se presenta (Gráfica 4.49) es la número tres que es la presentó menos alteraciones a lo largo de la prueba, alteraciones debidas a factores externos como son la colocación de forma brusca de las pesas y giros rápidos en la manivela por mencionar algunos.

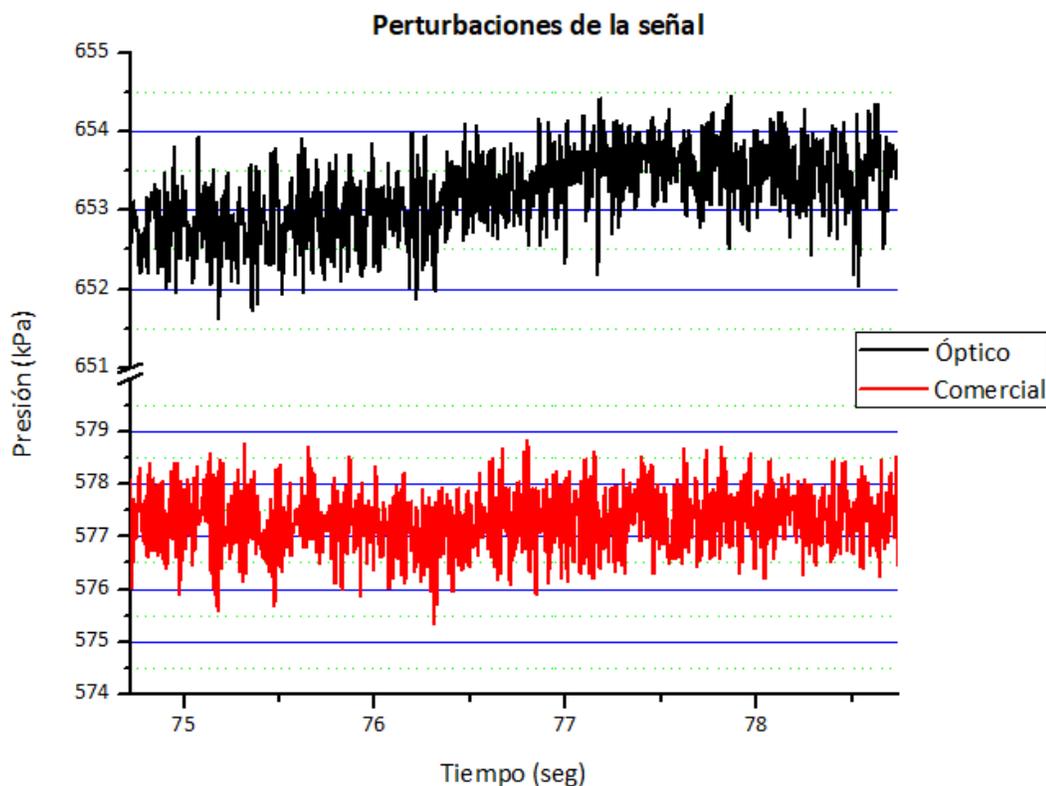


**Gráfica 4.49** Comportamiento de los valores de presión en ambos sensores.

La presión que indican los sensores está por debajo de los valores que indica la balanza de peso muerto. Los valores de presión referenciados por la balanza de peso muerto son los que se pueden apreciar en el eje Y.

El resultado de la comparación, se puede observar en la gráfica, la respuesta de ambos sensores es la misma, detectan los cambios de presión en el mismo instante de tiempo. La parte sombreada de amarillo representa el máximo valor de presión ejercida por la balanza de peso muerto en donde se observa que el sensor óptico queda por debajo del valor del sensor comercial (Keller). Las partes sombreadas de color gris indican una pérdida de presión (se presenta en todas las pruebas y en el mismo rango) por parte de la balanza de peso muerto.

Las perturbaciones en las señales de presión que se obtienen llaman la atención y se realiza un acercamiento para saber si afectan o no las mediciones (Grafica 4.50) y se observa que las diferencias oscilan entre 3 y 4 kPa de un rango de 100 kPa (de 3% a 4%).



**Grafica 4.50** Los valores de las perturbaciones varían entre 3 y 4 kPa a lo largo de la prueba de comparación.

Los resultados obtenidos de la prueba tres se presentan a continuación (Tabla 4.5). El sensor óptico se encuentra por arriba de los valores de referencia durante toda la prueba y el porcentaje de error va disminuyendo desde un 73.82 % hasta un 4.7% cuando alcanza la máxima presión (1000 kPa), el porcentaje de error varia de 8.16% hasta un 78.33% al variar los rangos desde la máxima presión hasta llegar a cero. Los resultados para el sensor comercial también indican que están desfasados en referencia a los valores de presión provenientes de la balanza de peso muerto; al inicio de la prueba el error que presenta es de un 21.32% y desciende hasta llegar a 2.55% al alcanzar la máxima presión y de nuevo aumenta el error hasta 22.2% cuando la presión llega a cero.

**Tabla 4.5** Resultados de la comparación de los sensores utilizando la balanza de peso muerto.

PRUEBA No. 3				
Presión de referencia (kPa)	Presión Sensor Óptico (kPa)	Error (%)	Presión Sensor Comercial (kPa)	Error (%)
0	147.16	0	49.89	0
100	173.82	73.82	78.68	21.32
200	257.82	28.91	178.17	10.92
300	351.56	17.19	277.78	7.407
400	455.38	13.85	378.07	5.483
500	556.55	11.31	477	4.6
600	653.11	8.852	577.89	3.685
700	748.65	6.95	676.71	3.327
800	852.12	6.515	776.41	2.949
900	942.95	4.772	875.93	2.674
1000	1000	0	974.5	2.55
900	973.5	8.167	875.56	2.716
800	897.62	12.2	776.63	2.921
700	813.47	16.21	675.89	3.444
600	717.11	19.52	577.35	3.775
500	565.81	13.16	477.55	4.49
400	483.71	20.93	378.19	5.453
300	389.16	29.72	269.35	10.22
200	286.65	43.33	179.23	10.39
100	178.33	78.33	77.8	22.2
0	143.16	0	40.52	0

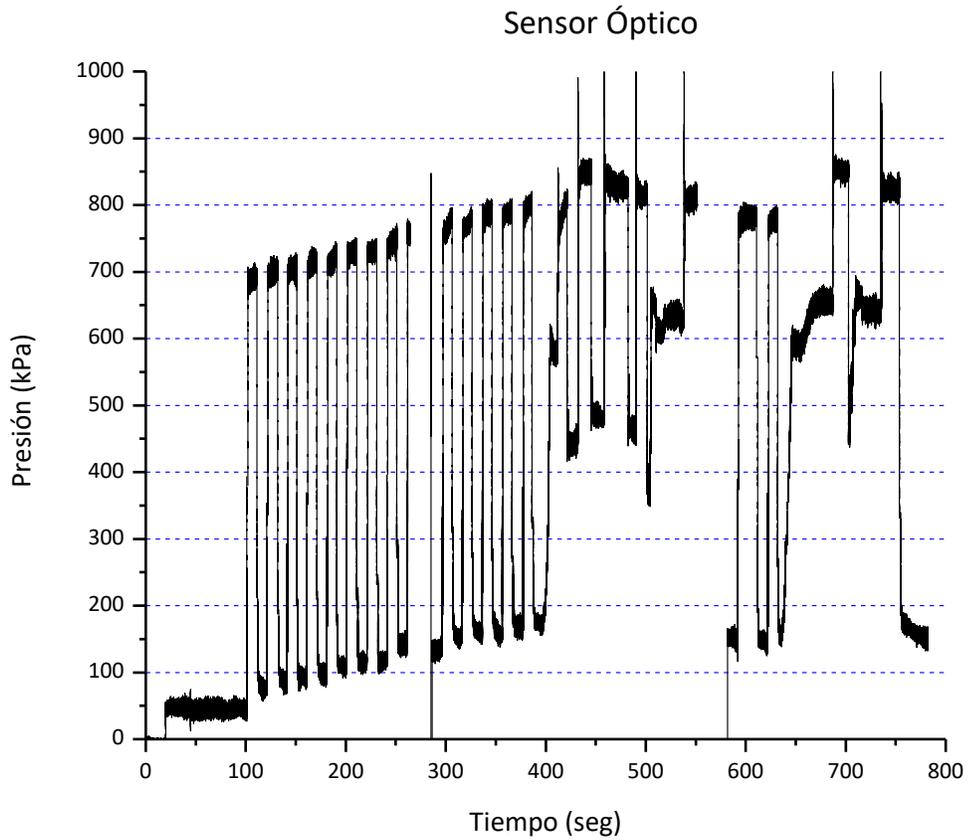
Con los resultados mostrados en la tabla anterior, se observa que ambos sensores presentan diferencias en los valores obtenidos a los valores de referencia siendo el sensor óptico el del error más grande. Para obtener un porcentaje de error de los dos sensores se realiza un promedio de todas las pruebas (Tabla 4.6) siendo el sensor óptico el de mayor error en las mediciones con un 17.92% contra un 7.3% del sensor comercial (diferencia aproximada de un 10%).

**Tabla 4.6** Resultado promedio del error de los sensores.

<b>ERROR (%)</b>		
	<b>ÓPTICO</b>	<b>COMERCIAL</b>
P1	10.7	7.2
P2	15.1	8.9
P3	21.7	6.9
P4	22.5	6.7
P5	19.6	6.8
<b>PROMEDIO</b>	<b>17.92</b>	<b>7.3</b>

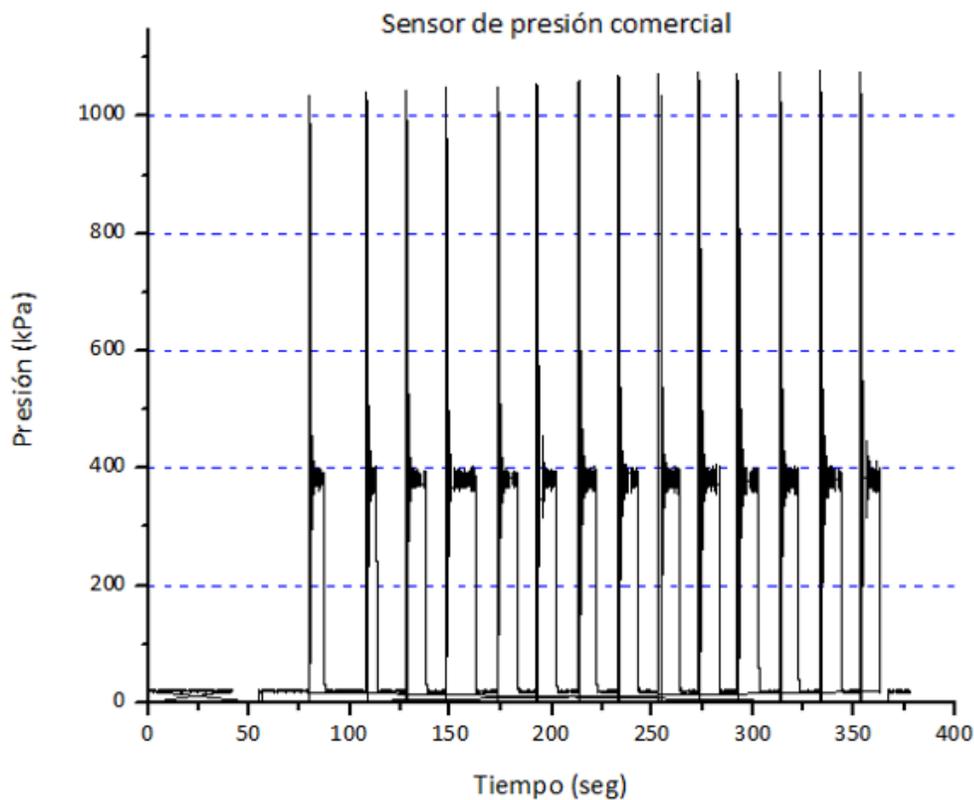
#### **4.10 PRUEBAS FINALES EN EL GOLPE DE ARIETE**

Realizada la calibración y comparación del sensor óptico, se vuelve a conectar al golpe de ariete para observar el comportamiento de los resultados de pruebas en sitio. La Gráfica 4.51 muestra los valores de presión en kPa obtenidos en una prueba. Se observan los cambios de presión y las perturbaciones que se reflejan al momento de realizarse el golpe de ariete, el único inconveniente es al aumento y descenso de la señal en los puntos mínimos y máximos de la presión. Estos últimos datos son de importancia ya que demuestran si el sistema del sensor óptico es estable o no.



**Gráfica 4.51** Resultados obtenidos en el golpe de ariete.

Es turno de observar el comportamiento del sensor comercial (Keller) y determinar el funcionamiento del sistema para descartar si los aumentos o descensos de la señal que presenta el sensor óptico son propios del golpe de ariete o proviene del sensor (Gráfica 4.52).

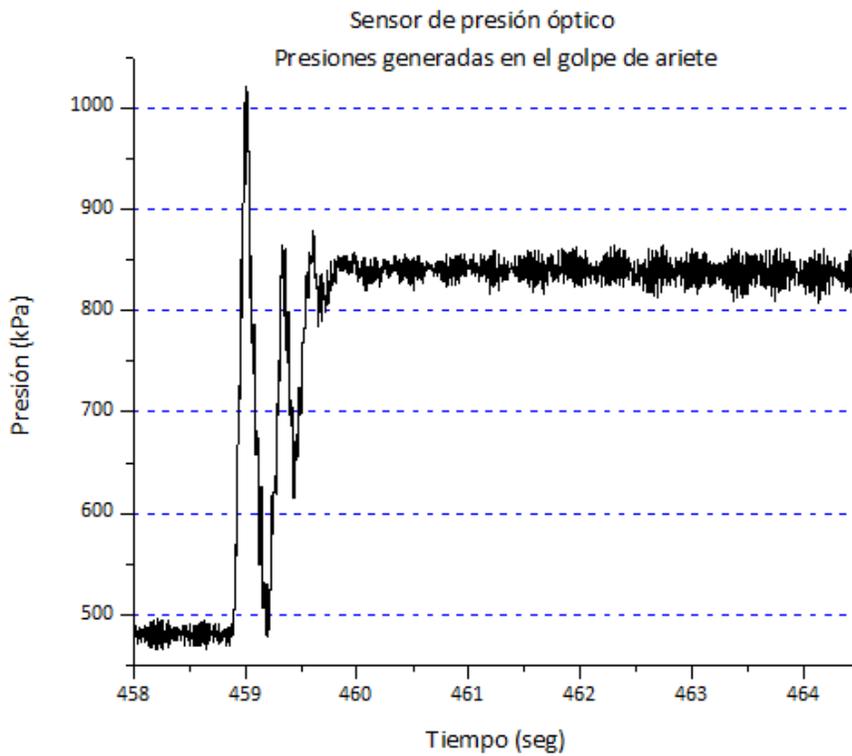


**Gráfica 4.52** Resultados obtenidos del sensor comercial en el golpe de ariete.

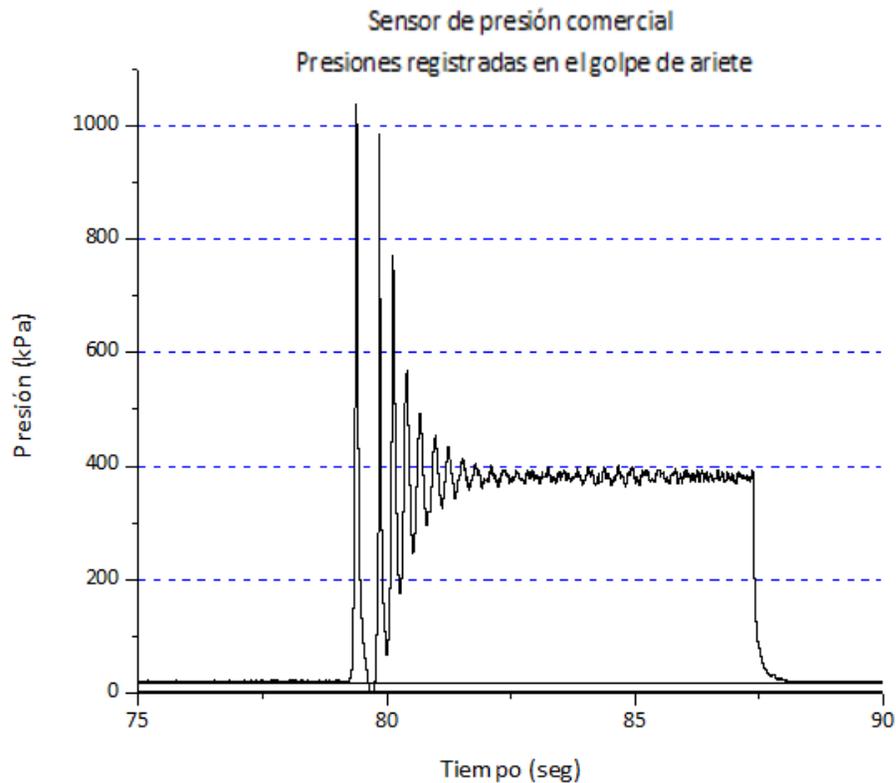
Con los datos representados en las gráficas anteriores, se establece que el aumento y descenso de continuos de la señal del sensor óptico es propio de él atribuidos a los pequeños valores de voltaje con los que se trabaja, ahora es turno de observar que pasa en las perturbaciones cuando se hace el golpe de ariete. En primer lugar, se presentan los valores para el sensor óptico (Gráfica 4.53) y a continuación los valores para el sensor comercial (Gráfica 4.54).

Cabe mencionar que estas perturbaciones son de gran importancia para el análisis de eficiencia en turbinas, por ello, hacemos hincapié en este aspecto. De acuerdo a las gráficas, el sensor óptico presenta una señal amortiguada donde solo se aprecian tres ciclos completos y después de ello la señal se

estabiliza, en comparación al sensor comercial donde se aprecian hasta ocho ciclos completos y después de ello se estabiliza.



**Gráfica 4.53** Valores de presión durante el golpe de ariete.



**Gráfica 4.54** Valores de presión durante el golpe de ariete.

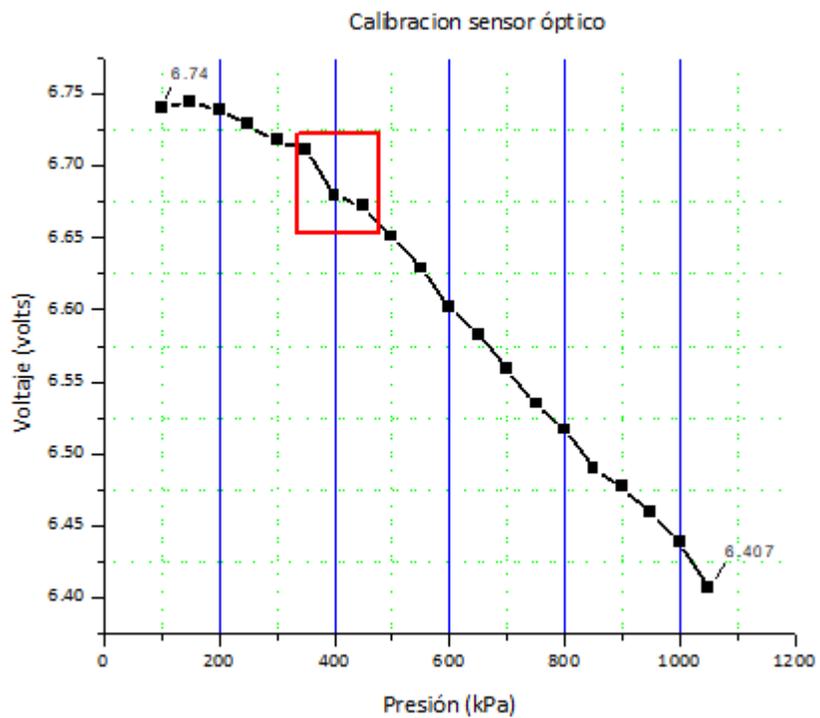
Con los datos recabados de las gráficas anteriores, se aprecia que el sensor comercial tiene una mayor sensibilidad a los cambios de presión dentro del sistema que el sensor óptico. Otro de los aspectos importantes que se aprecian se refiere al rango de operación, mientras que el sensor óptico está diseñado para trabajar en un rango de operación de 0 a 1000 kPa, en el sistema de golpe de ariete se alcanzan mayores presiones a la de diseño, presentando inconvenientes en cuanto a la deformación del material con el que está fabricado el sensor y posibles daños a la membrana que se encuentra en la parte superior de la tapa por exceder su deformación.

Resultado de las pruebas es la deformación de la tapa (Figura 4.30), la tapa es cambiada por otra similar en cuanto a espesor y dimensiones; y se repite la prueba de calibración, esta vez, se tendrá cuidado a cualquier cambio brusco

de presión y de no superar los 800 kPa de presión para evitar la deformación de la tapa. Los resultados de la calibración utilizando la fibra F16 (10%) se presentan en la Gráfica 4.55.

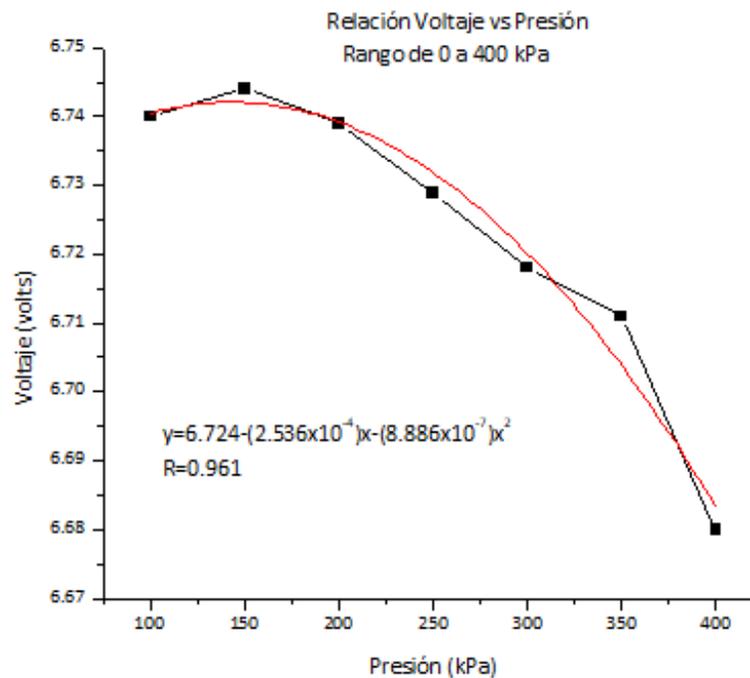


**Figura 4.30** Tapa del sensor deformada.



**Gráfica 4.55** Nueva calibración del sensor óptico.

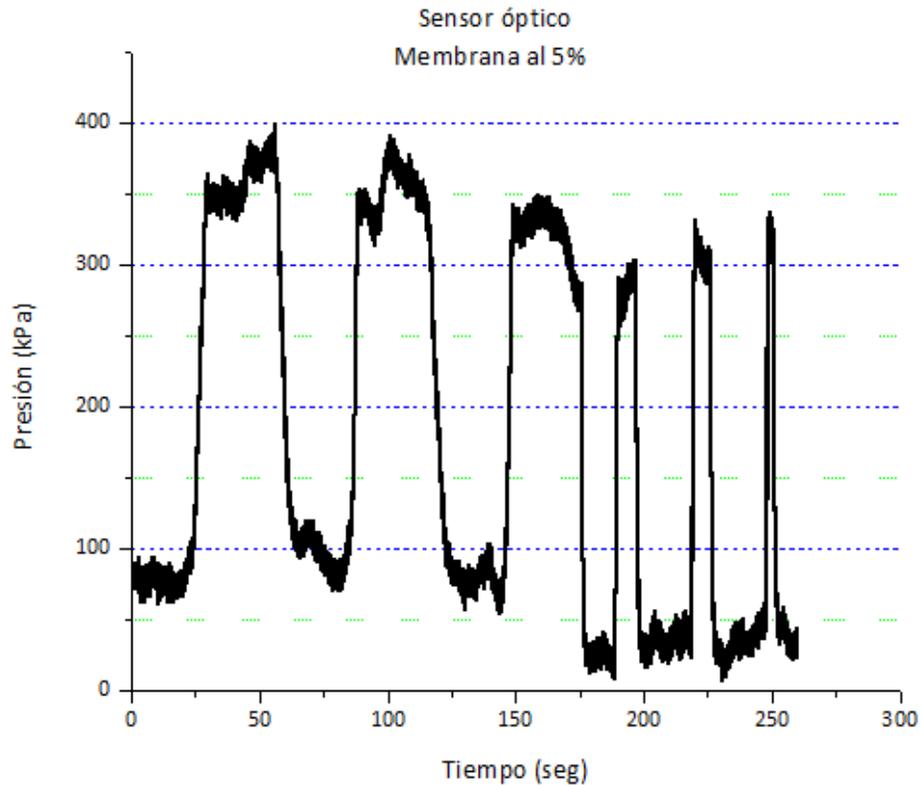
De la gráfica anterior, se puede observar un cambio en la señal en los 400 kPa de presión, lo cual indica una perturbación en la fibra dentro de la membrana, este cambio se presenta en todas las pruebas de calibración. Con estos cambios en la señal, se establece el rango de operación del sensor que será de 0 a 400 kPa, con esto se prevé que la fibra no se dañe en futuros trabajos y la tapa de INOX no sufra deformación. La función que describe la relación entre el voltaje y la presión en este rango se presenta a continuación (Gráfica 4.56).



**Gráfica 4.56** Ecuación que describe la relación del voltaje y la presión en el rango de 0 a 400 kPa.

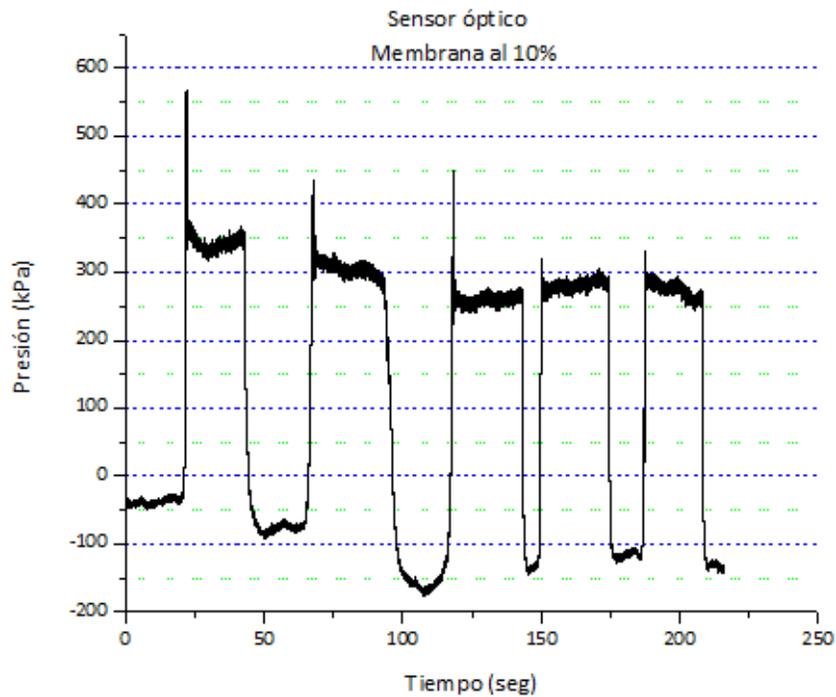
Establecidos el rango de operación y la ecuación que describe la relación entre voltaje y presión, se procede a utilizar las tres fibras existentes en las membranas al 5%, 10% y 20% de catalizador, para observar su comportamiento de cada una con la nueva tapa del sensor conectado al golpe de ariete y comparar sus resultados con el sensor comercial (Gráficas 4.57,

4.58, 4.59 y 4.60). Cabe mencionar que el golpe de ariete estará funcionando y se realizarán aperturas y cierres de válvula con la finalidad de observar las perturbaciones de la presión en la tubería.



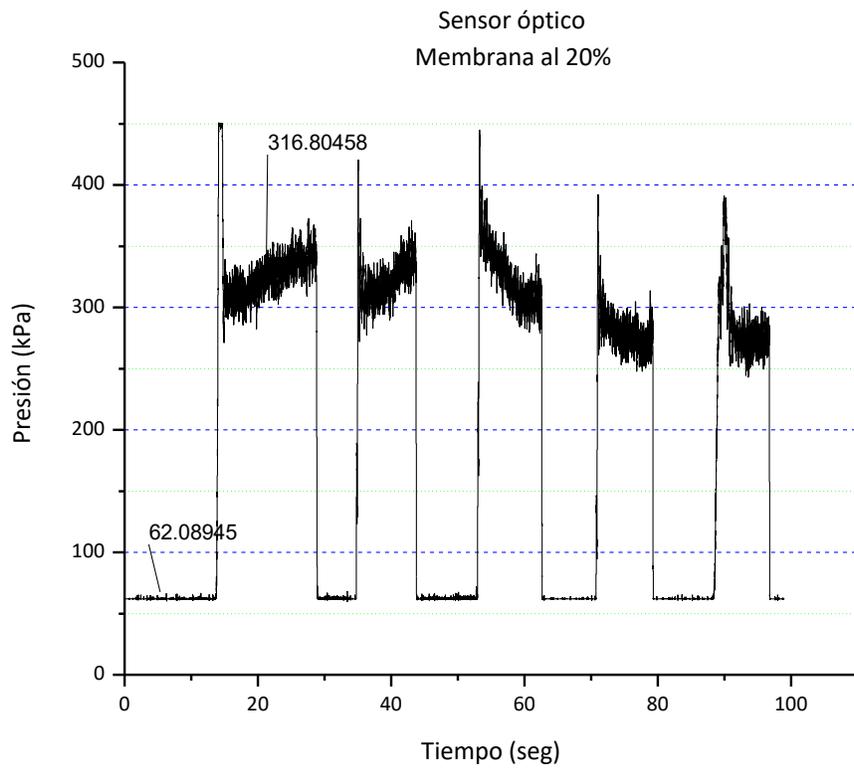
**Gráfica 4.57** Resultados utilizando la fibra F15 dentro de la membrana al 5% colocada en el golpe de ariete.

Los resultados obtenidos con la membrana al 5% muestran que el valor inicial se desplaza en un rango de 50 a 100 kPa de su valor inicial. Las perturbaciones del sistema desaparecen debido a la suavidad de la membrana.

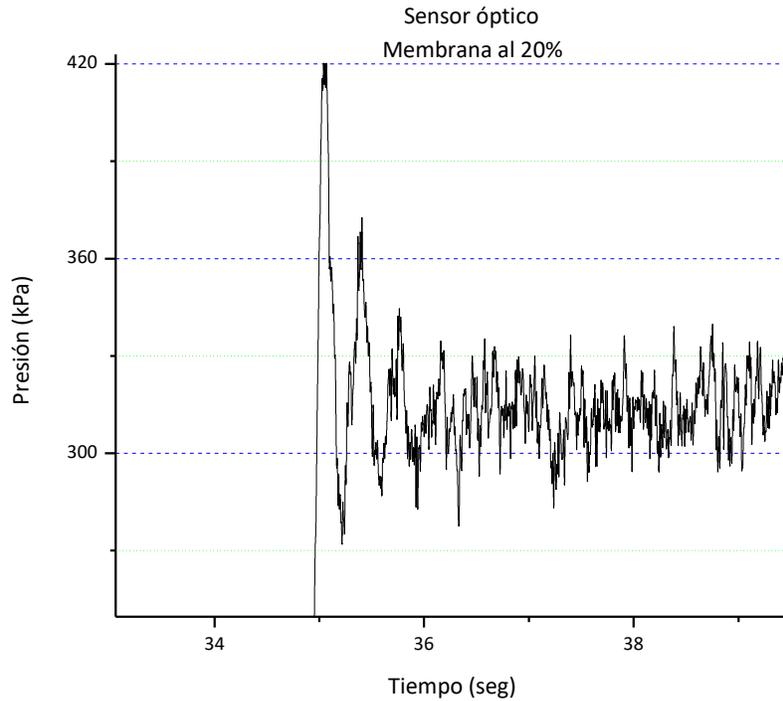


**Gráfica 4.58** Resultados de la fibra F16 en el golpe de ariete.

Utilizando la membrana al 10%, se puede apreciar que el valor inicial de presión se desplaza en un rango de 100 kPa, el cual es el doble que en la membrana suave. La diferencia es que esta membrana percibe las perturbaciones del sistema, pero después de tres repeticiones las perturbaciones comienzan a disminuir.



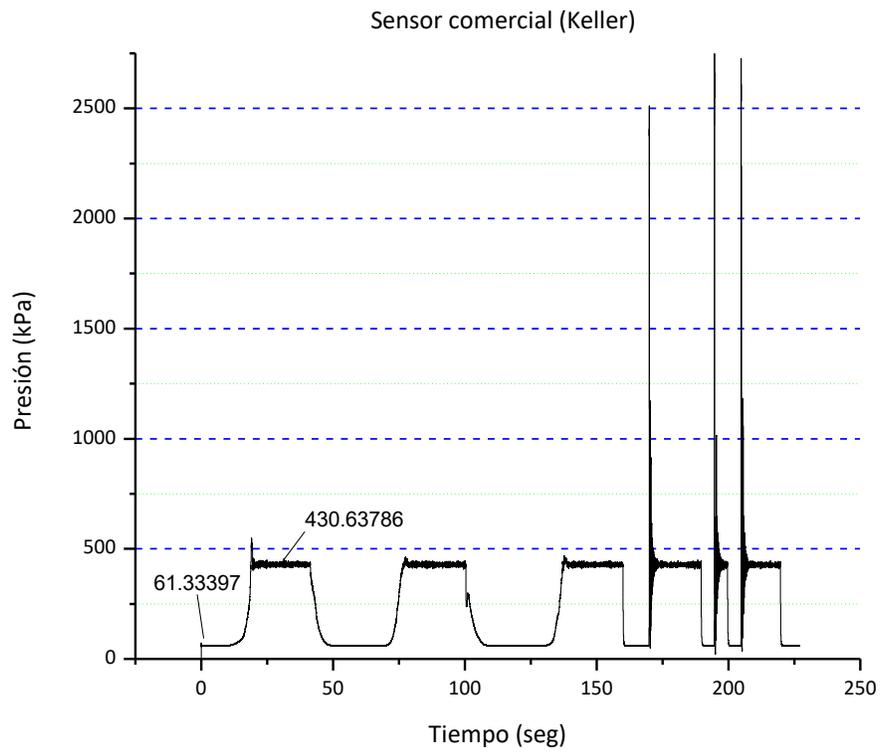
a)



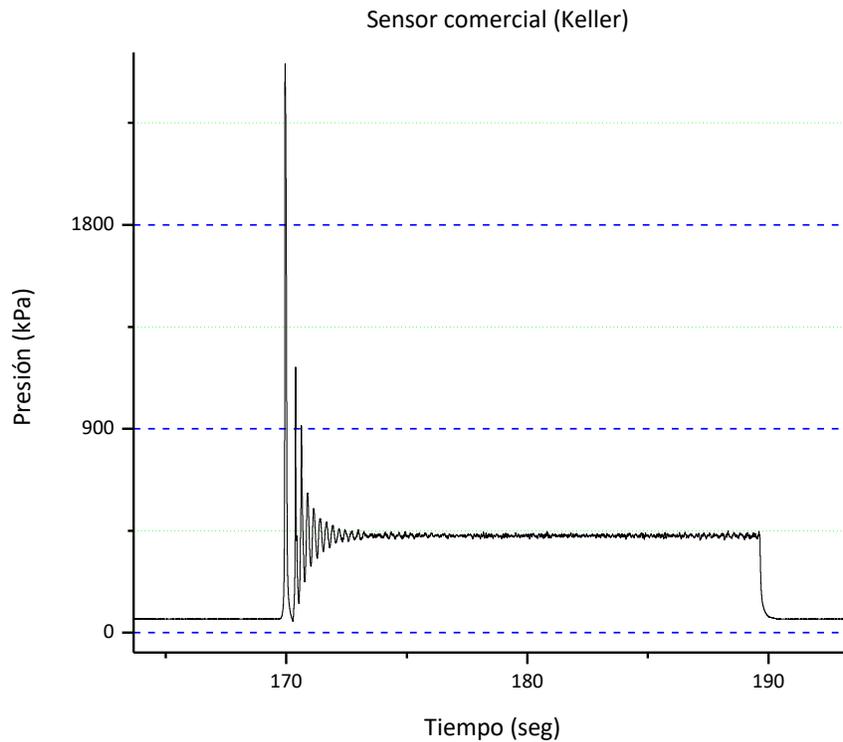
b)

**Gráfica 4.59** a) Resultados de la fibra F18 en el golpe de ariete, b) comportamiento durante el cierre de la válvula.

Los resultados utilizando la membrana con 20% de catalizador, presentan una respuesta más rápida a los cambios de presión, el desplazamiento de la señal se mantiene en un rango de 50 kPa (7.2 psi). Las perturbaciones se pueden apreciar más claramente que con la membrana anterior, aunque la señal presente una señal inestable debido a que la membrana es muy sensible y detecta los cambios pequeños de la presión en la tapa del sensor.



a)



b)

**Gráfica 4.60** a) Resultados del sensor comercial, b) comportamiento de la señal durante el cierre de la válvula.

El sensor comercial continúa presentando el mismo comportamiento que en todas las pruebas, su señal es estable y se pueden llegar a contar hasta ocho ciclos en el momento del cierre y apertura de la válvula.

Como resultado de las pruebas en el golpe de ariete variando las fibras en las membranas en el sensor óptico y comparando los resultados con el sensor comercial se presenta una breve descripción de lo acontecido (Tabla 4.7).

**Tabla 4.7** Comportamiento de las fibras.

RESULTADOS				
Fibra	Catalizador (%)	Señal	Cambios de presión	Oscilaciones
F15	5%	Desplaza 50KPa	SI	NO
F16	10%	Desplaza 100 kPa	SI	SI
F18	20%	Desplaza 50kPa	SI	SI

De la tabla anterior se puede concluir lo siguiente: la fibra F15 detecta los cambios de presión mas no las perturbaciones provocadas por el cierre de la válvula en el golpe de ariete, la señal sigue descendiendo de su valor original; la fibra F16 también detecta los cambios de presión, en cuanto a las perturbaciones solo se aprecia un ciclo completo y la señal continua descendiendo y por último, para la fibra F18 los resultados obtenidos son los que tienen un mejor comportamiento, aunque la señal continua descendiendo durante las pruebas; en las perturbaciones se aprecian tres ciclos completos 5 menos que el sensor comercial pero triplica los obtenidos con la fibra F16.

Comparando los resultados de la fibra F18 y el sensor comercial para el nuevo rango de operación se determina lo siguiente: las diferencias entre el sensor óptico y el comercial se hacen notar en cuanto se cierra la válvula ya que el número de oscilaciones es mayor en el sensor comercial mientras que en los cambios de presión ambos sensores responden de forma similar.

El sensor óptico reporta mejores resultados cuando la tubería está abierta, la presión obtenida es de 61.3 kPa a diferencia del sensor comercial que reporta 62.08. Cuando la tubería se cierra, el sensor óptico reporta una presión de

316.8 kPa mientras que el sensor comercial 430.6 kPa, una diferencia de alrededor del 17% (porcentaje similar al de la tabla 4.6).

Con todos los datos recabados de las pruebas realizadas y cambios necesarios para el correcto funcionamiento del sensor óptico se llega a la siguiente conclusión: el sensor óptico se presenta como una alternativa ante los sensores convencionales que se encuentran en el mercado se puede mejorar el porcentaje de error. También, el rango de presión con el que se requiera trabajar no es impedimento para el sensor óptico debido a que, en las pruebas se observó que al modificar el diafragma y las membranas el rango de operación es variable. Todo esto, nos lleva a centrar la atención en la etapa de adquisición de señal para mejorar la estabilidad del sistema debido a los pequeños valores de voltaje que hacen que cualquier variación por más pequeña que sea afectará al sensor.

# CAPITULO 5

## CONCLUSIONES FINALES Y RECOMENDACIONES

---

A continuación, se presentan las conclusiones generadas a partir de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a distintas fibras SMS y membranas fabricadas, moldes propuestos y arreglos experimentales utilizados a lo largo de esta investigación. Para finalizar, se exponen recomendaciones y propuestas para trabajos futuros.

### 5.1 CONCLUSIONES

En función de los objetivos específicos planteados para este trabajo:

- Caracterización de las fibras MMI.
- Caracterización de diferentes membranas.
- Análisis y diseño del encapsulado para el sistema.
- Establecer ecuaciones matemáticas para la calibración del sensor.
- Comparar el sensor con otros sensores comerciales.
- Realizar pruebas en el simulador de golpe de ariete.

Se generan las siguientes conclusiones:

- Se logra la fabricación de las fibras SMS dentro del laboratorio, lo cual proporciona un gran avance para el desarrollo de fibras futuras. La caracterización de las fibras que se fabrican proporciona información para el uso que se deseé dar a cada una de las fibras fabricadas, su respuesta ante los cambios de presión sobre la fibra se comporta de forma lineal, es decir, al aumentar la presión sobre la fibra la intensidad de la señal disminuye y en caso contrario, al disminuir presión sobre ella la intensidad de la señal aumenta.

- La nueva forma de fabricar membranas de PDMS con fibra SMS en su interior, permite reducir errores en cuanto al método pasado; se reducen los bordes en la membrana permitiendo colocarla sobre superficies planas sin provocar flexión en la fibra al momento de presionarla.
- Los diferentes niveles de dureza permiten variar los rangos de presión que pueden soportar, así como la velocidad de la respuesta. Membranas duras para respuesta rápida y valores de presión pequeños, por otro lado, membranas suaves con respuesta lenta permiten una mayor lectura de valores y soportar altos rangos de presión.
- Ahora, cada membrana que se fabrica proporciona un panorama de donde se pueden utilizar dependiendo el material (Nylamid o acero inoxidable) y el desplazamiento que se tenga.
- Como resultado de las pruebas realizadas con los materiales sugeridos, se puede establecer un rango de operación para cada uno de ellos, para el Nylamid se establecen bajos rangos que vayan de 0 a 25 psi, mientras que el acero inoxidable permite trabajar dentro de un rango de 0 hasta 425 psi.
- Se presentan cuatro propuestas con diferentes geometrías en el interior para el encapsulado o molde del sensor, de las cuales, la que presenta mejor comportamiento en cuanto a la concentración de la presión en la parte superior es la geometría de interior cilíndrico de baja altura; en donde la presión se concentra a 0.00048 m del centro, con esto se asegura que la presión modifique la intensidad de la señal que pasa por la fibra dentro de la membrana.
- Se establece la ecuación matemática que nos permite relacionar los valores de voltaje obtenidos con valores de presión (hasta 145 psi o 1 MPa), obteniendo un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0.998, al trabajar con esta ecuación se presentan errores de medición o perturbaciones en el rango de los 58 psi (400 kPa) indicando un alto porcentaje de que

la fibra se pueda fracturar, por lo cual se establece el nuevo rango de operación y se obtiene un nuevo modelo matemático que el mejor resultado arroja un coeficiente de correlación de 0.96.

- Con el modelo matemático corregido, se realizan las pruebas de comparación teniendo como referencia la balanza de peso muerto arrojan un error promedio de 17.02 % a comparación de un 7.3 % que presenta el sensor comercial. Lo que demuestra que el sensor comercial presenta un error por arriba del indicado en sus especificaciones.
- Continuando con la comparación entre los sensores, se conectan al golpe de ariete en el cual se puede observar que la respuesta del sensor óptico es similar a la del sensor comercial. Los cambios de la presión dentro de la tubería del golpe de ariete son visibles en ambos sensores, inclusive el sensor óptico presenta las perturbaciones que presenta el sensor comercial solo que, en un menor número, las cuales dependerán de la dureza de la membrana con la que se esté trabajando. La señal no es estable a lo largo de la prueba ya que comienza a descender, pero manteniendo el mismo comportamiento durante toda la prueba.
- Para finalizar, las pruebas en el golpe de ariete que arrojan mejores resultados son las realizadas con la fibra del segundo lote F18, presenta menos perturbaciones que el sensor comercial pero más que las otras fibras, debido a la dureza de la membrana que permite detectar pequeños cambios de presión. La señal se mantiene en un rango de desplazamiento de 7 psi (50 kPa).
- El porcentaje de error entre las mediciones del sensor óptico y el comercial mantienen una diferencia del 17%, considerando al sensor comercial como la referencia de las mediciones.

Además de lo antes mencionado, podemos comentar lo siguiente:

- La utilización de la membrana al 10% del lado B presentó un comportamiento lineal tanto en el Nylamid como el Acero.
- La atenuación del sensor Keller se presenta cuando existe más de una conexión en los puntos de medición de presión. Si el sensor Keller se conecta solo, funciona correctamente.
- La purga del sensor ayuda a reducir la presencia de aire, pero la ubicación no es la correcta. La única forma de sacar el aire del sensor óptico es llenándolo antes de instalarlo en la tubería.
- Una de las ventajas de llenar el molde antes de conectarlo a la tubería es la presencia de perturbaciones al provocar golpes de ariete, comportamiento similar a los sensores previamente instalados.

## **5.2 TRABAJOS FUTUROS**

- Trabajar en la variación de rangos de operación, ya que se puede adecuar el material del molde, la membrana y la fibra SMS a las necesidades que se requieran.
- Trabajar en la reducción del tamaño de la fibra SMS y por consiguiente de la membrana.
- Trabajar en la reducción de tamaño del molde para que sea más fácil transportarlo y conectarlo a diferentes componentes.
- Trabajar en el desarrollo del sensor diferencial ya que se cuenta con bases suficientes para poder fabricarlo.
- Trabajar en la parte electrónica para poder eliminar o reducir en lo mas posible el desplazamiento de la señal.
- Implementar este tipo de sensor en donde se requiera medir presión como los túneles de viento por mencionar un ejemplo.

# REFERENCIAS

---

- [1] A.R. Mejía – Aranda, Elaboración de un sensor de presión de fibra óptica mediante la técnica MMI, Tesis de Maestría, UAEM – CIICAp, 2012.
- [2] Francis T.S. Yu, Shizhuo Yin, Fiber Optics Sensors, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 2012.
- [3] Concepción Pérez Conde, Sensores Ópticos, Universidad de Valencia, España, 1996.
- [4] Qian Wang and Gerald Farrell, All-fiber multimode-interference-based refractometer sensor: proposal and design, Optics Letters, 31 (3) (2006) 317 – 319.
- [5] Carola Strandman *et. al*, A production process of silicon sensor elements for a fibre-optic pressure sensor, Sensors and Actuators A, 63 (1997) 69 – 74.
- [6] Daniel Kacik *et. al*, Locally pressed etched optical fiber with PDMS coating for a sensor application, Optik, 127 (2016) 5631 – 5635.
- [7] Daru Chen, Xin Cheng, H.Y. Tam, Hydrostatic pressure sensor based on a gold-coated thin-core fiber modal interferometer and ripple shift measurement, Optics Communications, 285 (2012) 3471 – 3474.
- [8] Denis Donlagic, Edvard Cibula, All-fiber high-sensitivity pressure sensor with SiO<sub>2</sub> diaphragm, Optics Letters, 30 (16) (2005) 2071 – 2073.
- [9] F. Ceysens, *et. al*, A low-cost and highly integrated fiber optical pressure sensor system, Sensors and Actuators A, 145-146 (2008) 81 – 86.
- [10] G.C. Hill *et. al*, SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor, Sensors and Actuators A, 138 (2007) 52 – 62.
- [11] Gang He *et. al*, Fiber-optic sensor employing thin-film-coating optical spectrum modulation, Optics Letters, 18 (13) (1993) 1113 – 1115.
- [12] H. Ahmad *et. al*, Fiber optic displacement sensor for micro-thickness measurement, Sensor Review, 32 (3) (2012) 230 – 235.

- [13] Haiyan Chen, Fiber optic pressure sensor based on a single-mode fiber F-P cavity, *Measurement*, 43 (2010) 370 – 374.
- [14] Hossein Golnabi, Fiber optic displacement sensor using a coated lens optic, *Review of scientific instruments*, 71 (11) (2000) 4314 – 4318.
- [15] Ji-Huan Chen *et. al*, Fabry-Perot interference-based fiber-optic sensor for small displacement measurement, *Optics Communications*, 283 (2010) 3315 – 3319.
- [16] Jiali Zhu *et. al*, An optical fiber Fabry-Perot pressure sensor using corrugated diaphragm and angle polished fiber, *Optical Fiber Technology*, 34 (2017) 42 – 46.
- [17] Jonghyun Eom *et. al*, Fiber optic Fabry-Perot pressure sensor based on lensed fiber and polymeric diaphragm, *Sensors and Actuators A: Physical*, 225 (2015) 25 – 32.
- [18] Juncheng Xu *et. al*, Miniature all-silica fiber optic pressure and acoustic sensors, *Optics Letters*, 30 (24) (2005) 3269 – 3271.
- [19] Kao, T. W. and Taylor, H. F., High-sensitivity intrinsic fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor, *Optics Letters*, 21 (8) (1996) 615 – 617.
- [20] Katsuhiko Osaka *et. al*, Effects of pressure on measurement of strain in EFPI optical fiber sensors embedded in FRP laminates, *Adv. Composite Mater.*, 10 (23) (2001) 169 – 176.
- [21] M. Campbell and G. Zheng, A novel fibre optic strain sensor, *Int. J. Electronics.*, 85 (4) (1998) 545 – 552.
- [22] M. Yasin *et. al*, Fiber optic displacement sensor using fiber coupler probe and real objects, *Sensor Review*, 32 (3) (2012) 212 – 216. O.
- [23] O. Tohyama *et. al*, A fiber-optic silicon pressure sensor for ultra-thin catheters, *Sensors and Actuators A*, 54 (1996) 622 – 625.
- [24] P. Benjamin Varghese *et. al*, A quasi distributed fiber optic weight-displacement sensor using macro bends”, *Optical Fiber Technology*, 18 (2012) 215 – 219.

- [25] P.P. Branzalov *et. al*, Fiber optic displacement sensor with a short hollow metal optical waveguide, *Review of scientific instruments*, 70 (4) (1999) 2166 – 2168.
- [26] P. Roriz *et. al*, A Fabry-Perot sensor prototype for low-pressure measurements, *Microwave and Optical Technology Letters*, 56 (2014) 2981 – 2984.
- [27] Qingxu Yu and Xinlei Zhou, Pressure sensor based on the fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer, *Photonic Sensors*, 1 (1) (2011) 72 - 83.
- [28] Robert A. Pinnock, Optical pressure and temperature sensors for aerospace applications, *Sensor Review*, 18 (1) (1998) 32 – 38.
- [29] Robert S. Fielder *et. al*, State of the art in high-temperature fiber optic sensors, *Fiber Optic Sensor Technology and Applications III*, 5589 (2004) 60 – 69.
- [30] Sang, K. Alexander and Boyd, Clark, An integrated High-Pressure, Pressure Temperature and Skin Friction Sensor, *Fiber Optic Sensors and Applications VI*, 7316 (2009).
- [31] Tomasz R. Wolinski *et. al*, Prototype fiber optic liquid crystalline sensor for pressure monitoring, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 48 (3) (1999) 684 – 687.
- [32] V.A. Korolyov and V.T. Potapov, Biomedical fiber-optic temperature and pressure sensors, *Biomedical Engineering*, 46 (2) (2012) 79 – 82.
- [33] William N. MacPherson *et. al*, Miniature fiber optic pressure sensor for turbomachinery applications, *Review of Scientific Instruments*, 70 (3) (1999) 1868 – 1874.
- [34] Wei Peng *et. al*, High-temperature fiber optic cubic-zirconia pressure sensor, *Optical Engineering*, 44 (12) (2005), 713 – 717.
- [35] Yixian Ge *et. al*, Miniature fiber pressure sensor based on fiber etching, *Optik*, 124 (2013) 4 – 7.

- [36] Z. Xiao *et. al*, Diaphragm deflection of silicon interferometer structures used as pressure sensors, *Sensors and Actuators A*, 58 (1997) 99 – 107.
- [37] Zengling Ran *et. al*, Miniature Fiber-Optic tip high pressure sensors micromachined by 157 nm laser, *IEEE Sensors Journal*, 11 (5) (2011) 1103 – 1106.
- [38] Zhengyu Huang *et. al*, High-Pressure Fiber Optic Acoustic Sensor, *Fiber Optic Sensor Technology and Applications III*, 5589 (2004) 278 – 286.
- [39] Zhengyu Huang *et. al*, Fiber temperature sensor for high-pressure environment, *Optical Engineering*, 44 (10) (2005).
- [40] Chia-Min Lin *et. al*, A Simultaneous Pressure and Temperature Sensor Based on a Superstructure Fiber Grating, *Fiber Optic Sensor Technology and Applications III*, 5589 (2004) 287 – 294.
- [41] Christopher Holmes *et. al*, Integrated optical differential pressure transducers achieved using thin buckled silica membranes and direct UV written planar Bragg gratings, *Sensors and Actuators A*, 168 (2011) 14 – 21.
- [42] Daqing Tang *et. al*, Fiber loop ring-down optical fiber grating gas pressure sensor”, *Optics and Lasers in Engineering*, 48 (2010) 1262 – 1265.
- [43] Frantisek Urban *et. al*, Design of a Pressure Sensor Based on Optical Fiber Bragg Grating Lateral Deformation, *Sensors*, 10 (2010) 11212 – 11225.
- [44] Gregory P. Behrmann *et. al*, Fiber optic micro sensor for the measurement of tendons forces, *Biomedical Engineering Online*, 11 (2012) 1 – 16.
- [45] Hao-Jan Sheng *et. al*, High-sensitivity temperature-independent differential pressure sensor using fiber Bragg gratings, *Optics Express*, 16 (20) (2008) 16013 – 16018.
- [46] Jun Huang *et. al*, A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation, *Measurement*, 46 (2013) 1041 – 1046.
- [47] J.D. Lekki and Grigory Adamovsky, Demodulation System for Fiber Optic Bragg Grating Dynamic Pressure Sensing, NASA STI Program (2001).

- [48] Lihui liu *et. al*, Temperature-independent FBG pressure sensor with high sensitivity, *Optical Fiber Technology*, 13 (2007) 78 – 80.
- [49] M. G. Xu *et. al*, Optical In-Fibre grating high pressure sensor, *Electronics Letters*, 29 (4) (1993) 398 – 399.
- [50] Tuan Guo *et. al*, Temperature-insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensing system, *Optics Letters*, 31 (15) (2006) 2269 – 2271.
- [51] Wentao Zhang *et. al*, Fiber Bragg grating pressure sensor with ultrahigh sensitivity and reduced temperature sensitivity, *Optical Engineering*, 48 (2) (2009) 1 – 4.
- [52] Yong Zhao *et. al*, Differential FBG sensor for temperature-compensated high-pressure (or displacement) measurement, *Optics & Laser Technology*, 36 (2004) 39 – 42.
- [53] Yong Zhao *et. al*, Self-compensated high-pressure sensor with a high-birefringence fiber Bragg grating and a bulk modulus, *Optical Engineering*, 44 (1) (2005) 1 – 5.
- [54] Chih-Wei Lai *et. al*, Application of Fabry-Perot and fiber Bragg grating pressure sensors to simultaneous measurement of liquid level and specific gravity, *Measurement*, 45 (2012) 469 – 473.
- [55] Grzegorz Fusiek *et. al*, Design of a highly accurate optical sensor system for pressure and temperature monitoring in oil wells, *International Instrumentation and Measurement, Technology Conference* (2009).
- [56] K. Bremer *et. al*, Temperature compensated miniature all-glass fibre optic pressure sensor, *IEEE* (2011).
- [57] Alok Mehta *et. al*, Multimode Interference-Based Fiber-Optic Displacement Sensor, *IEEE Photonics Technology Letters*, 15 (8) (2003) 1129 – 1131.
- [58] Daniel A. May-Arrijo *et. al*, Fiber optic pressure sensor using a conformal polymer on multimode interference device, *IEEE Sensors Journal*, 16 (7) (2016) 1956 – 1960.

- [59] Dooyoung Hah *et. al*, An optomechanical pressure sensor using multimode interference couplers with polymer waveguides on a thin p<sup>+</sup>-Si membrane, *Sensors and Actuators*, 79 (2000) 204 – 210.
- [60] L. B. Soldano and E.C. Pennings, Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications, *J. Lightwave Technol.*, 13 (1995) 615 – 627.
- [61] V.I. Ruiz-Pérez *et. al*, Fiber optic pressure sensor using Multimode Interference, *Journal of Physics: Conference Series*, 274 (2011).
- [62] W.S. Mohammed *et. al*, Wavelength Tunable Fiber Lens Based on Multimode Interference, *Journal of Lightwave Technology*, 22 (2) (2004) 469 – 477.
- [63] E. E. Antúnez Cerón, Determinación de la concentración de LiBr en soluciones LiBr-H<sub>2</sub>O mediante las técnicas ópticas de transmitancia/absorbancia e interferencia multimodos”, Tesis de Maestría UAEM – CIICAp (2011).
- [64] Li E. and Peng G.D., Wavelength-encoded fibre-optic temperature sensor with ultra-high sensitivity, *Opt. Commun.*, 281 (2008) 5768 – 5770.
- [65] Mohammed W.S. *et. al*, All-fibre multimode interference bandpass filter, *Optical Letters*, 31 (2006) 2547 – 2549.
- [66] Tripathi S.M. *et. al*, Strain and temperature sensing characteristics of single-mode-multimode-single-mode structures, *J. Lightw. Technol.*, 27 (2009) 2348 – 2356.
- [67] Pallás Areny R., *Sensores y Acondicionadores de Señal*, fourth ed., Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, 2003.
- [68] Alan S. Morris, *Measurement and Instrumentation Principles*, third ed., Butterworth Heinemann, Great Britain, 2001.
- [69] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, *Termodinámica*, seventh ed., Mc. Graw-Hill, México, 2012.
- [70] Pérez García M. A. *et. al*, *Instrumentación Electrónica*, second ed., Thomson Paraninfo, España, 2004.

- [71] D.W. Ball, Field Guide to Spectroscopy, FG08, SPIE Field Guides, United States of America, 2006.
- [72] Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics, second ed., John Wiley & Sons, 1991.
- [73] Qian Wang et. al, Investigation on Single – Mode – Multimode – Single – Mode Fiber Structure, Journal of lightwave technology, 26 (5) (2008) 512 – 519.
- [74] S. A. Soper *et. al*, Polymeric microelectromechanical systems, Analytical Chemistry, 72 (2000) 642 – 651.
- [75] A. Santiago–Alvarado and S. Vázquez–Montiel, Propiedades físico-químicas de membranas PDMS empleadas en lentes líquidas, Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales. Superficies y Vacío, 22 (3) (2009) 61 – 66.
- [76] A. Santiago-Alvarado *et. al*, Fabricación y caracterización de membranas elásticas de PDMS para lentes líquidas con longitud focal variable (LLLFV), Sociedad Española de Óptica. Óptica Pura Aplicada, 41 (4) (2008) 381 – 388.

# APÉNDICE

## DESCRIPCIÓN DE EQUIPO EXPERIMENTAL

---



**LASER DIODE CONTROLLER DRIVER  
LDC 205 C**

Control Range (Continuous): 0 to  $\pm 500$  mA

Resolution: 10  $\mu$ A

Accuracy (Full Scale):  $\pm 0.5$  mA

Typical Noise without Ripple (10 Hz to 10 MHz, RMS):  $\mu$ A < 3  $\mu$ A

Typical Ripple (50/60 Hz, RMS):  $\mu$ A < 2  $\mu$ A

Transients (Typical): < 0.5 mA

Typical Drift in 24 hours (0 to 10 Hz at Constant Ambient Temperature) :  
<10 $\mu$ A

Temperature Coefficient : <50 ppm/ $^{\circ}$ C

Display: LED, 5 Digits

Operating Temperature: 0 to 40  $^{\circ}$ C

Storage Temperature: -40 to 70  $^{\circ}$ C

Warm-up Time: 10 Minutes

Weight: <3.1 kg

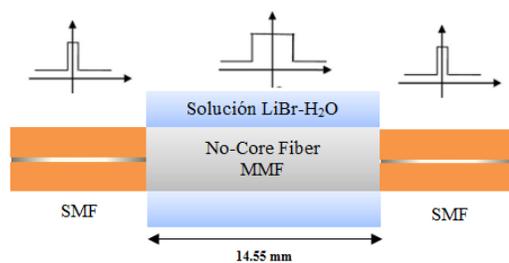
<http://www.thorlabs.com/catalogpages/V21/1439.PDF>



## BUTTERFLY LASER DIODE MOUNTS

Item #	LM14S2
Maximum Laser Current	5A
Polarity of Laser Diode	AG
Polarity of Monitor Diode	Floating
Maximum TEC Current	5A
Temperature Sensor	Thermistor <sup>†</sup>
Temperature Range <sup>‡</sup>	0 to 70 °C
Temperature Coefficient of Heat Sink	3 °C/W
Dimensions	3.5" x 3.5" x 1.25"

<http://www.thorlabs.com/catalogpages/V21/1482.PDF>



**FIBRA ÓPTICA SMS (*single mode – multi mode – single mode fiber*)**

La fibra SMS está constituida por una sección de fibra multimodo (MMF) de una determinada longitud considerando si se quiere generar una única autoimagen o múltiples imágenes, esta sección está empalmada entre dos secciones de fibra tipo monomodo (SMF). Tanto la sección MMF como la SMF tienen un perfil de índice de refracción escalonado. El elemento sensitivo MMF

tiene un diámetro de núcleo de 125  $\mu\text{m}$  sin revestimiento y un IR de aproximadamente 1.444, mientras que las secciones SMF tienen un diámetro de núcleo de  $\approx 10 \mu\text{m}$  y un diámetro de revestimiento de 125  $\mu\text{m}$  (para empatar al diámetro de la sección MMF), así como 1.450 y 1.461 de índices de refracción del revestimiento y núcleo, respectivamente.

La estructura SMS está caracterizada para una longitud de onda de 1555 nm y la sección MMF tiene una longitud de 14.55 mm para generar una primera auto-imagen del perfil de entrada a la salida de la misma.



**NI USB-6009**  
**DAQ MULTIFUNCIÓN DE BAJO COSTO DE**  
**14 Bits, 48 kS/s**

**Resumen de Especificaciones:**

<b>Producto</b>	USB-6009
<b>Número de Parte</b>	779026-01
<b>Sistema Operativo/Objetivo</b>	Linux , Mac OS , Pocket PC , Windows
<b>Tipos de Medida</b>	Voltaje
<b>Canales</b>	4 , 8
<b>Canales de una sola terminal</b>	8
<b>Canales Diferenciales</b>	4
<b>Resolución</b>	14 bits
<b>Velocidad de Muestreo</b>	48 kS/s
<b>Rendimiento (Todos los Canales)</b>	48 kS/s
<b>Máx. Voltaje de Entrada Analógica</b>	10 V

<b>Rango de Voltaje Máximo</b>	-10 V , 10 V
<b>Canales</b>	2
<b>Resolución</b>	12 bits
<b>Máx. Voltaje de Entrada Analógica</b>	5 V
<b>Rango de Voltaje Máximo</b>	0 V , 5 V
<b>Rango de Voltaje Mínimo</b>	0 V , 5 V

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201987>



### FUENTE DE ALIMENTACIÓN SENSOR KELLER

Voltaje de alimentación: 124 V CA.

Salidas de voltaje:

- 12 V CD, 1.2 A.
- 24 V CD, 1.2 A.



### QUAD DISPLAY TRIPLE OUTPUT DC POWER SUPPLIES

**MODEL 1672**

**BK PRECISION**

<b>Number of Outputs</b>	Three (two variable and one fixed)
<b>Range</b>	0 to 32 VDC / 0 to 3 A variable) and 5 V / 3 A fixed)
<b>Line Regulation</b>	<0.2% + 5 mA

Load Regulation	<0.2% + 8 mA
Voltage Accuracy	5 V ± 0.25 V
Voltage	3 digits 0.56" Green LED
Current	3 digits 0.56" Red LED
Accuracy	<0.1% + 3 digits
Power Requirements	115/230 V ± 10%, 50/60 Hz ± 10%
Dimensions (W x H x D)	9" x 6.7" x 12.2" (230 x 170 x 310 mm)
Weight	12.6 lbs (5.7 kg)

[http://www.bkprecision.com/downloads/datasheets/167x\\_datasheet.pdf](http://www.bkprecision.com/downloads/datasheets/167x_datasheet.pdf)



## CRYSTAL ENGINEERING M1-300PSI M1 DIGITAL PRESSURE GAUGE 300 PSI

### SPECIFICATIONS

#### ACCURACY

**20% to 100% of Full Scale:**  
±(0.2% of Reading).

**0 to 20% of Full Scale:**  
±(0.04% of Full Scale).

**Vacuum, for 2MPa (300 PSI, 20 bar, 20kg/cm<sup>2</sup>) and lower pressure gauges:**  
0 to -99.9 kPa (-14.5 PSIG);  
±(0.25% of Full Scale),  
where F.S.: -99.9 kPa (-14.5 PSIG).  
Not recommended for continuous use at high vacuum.

#### TEMPERATURE

**Operating & Compensated:**  
-10°C to 50°C (14°F to 122°F).  
No change in accuracy over operating temperature range.  
Gauge must be zeroed to achieve rated specification.

**Storage:** -40°C to 75°C (-40°F to 167°F).

#### ENCLOSURE

**Description:** Water resistant housing incorporating o-ring seals. Polyester/Polycarbonate blend compatible with common industrial fluids, including Skydrol.

**Weight:** 325g (11.5 oz).  
including batteries and protective boot.

#### CONNECTIONS

**Pressure Connection:** 1/4" NPT or G 1/4 B (BSP parallel fitting).

#### DISPLAY

**Numeral Height:** 16.8mm (0.66").  
**Description:** 5 full digits.  
**Display Rate:** 4 readings/second.

#### SENSOR

Piezoresistive silicon sensor with permanent oil isolation system and integral filter.

316 stainless steel welded (not brazed) sensor. No o-rings, thread tape, epoxy or sealant on any part of sensor assembly.

#### POWER

**Battery:** Two AA alkaline (LR6) batteries.

**Standard Battery Life:** 900 hours at 4 readings/second.

**Extended Battery Life:**  
1 reading/15 seconds ... **3,000 hours**  
1 reading/30 seconds ... **6,000 hours**  
1 reading/1 minute ... **10,000 hours**  
1 reading/5 minutes ... **25,000 hours**  
1 reading/10 minutes ... **30,000 hours**



#### MEDIA COMPATIBILITY

Liquids and gases compatible with 316 stainless steel.  
Available cleaned for oxygen service.

#### OVER SCALE LIMIT

Display will flash at 110% of Full Scale.

#### ADDITIONAL FEATURES

**Vertical bar graph**  
**Minimum (LO) & maximum (HI) capture**  
**Averaging**  
(2 to 20 samples).

**CE** Specifications include linearity, hysteresis, repeatability, temperature and stability for one year.

<http://www.transcat.com/PDF/CRYM1.pdf>

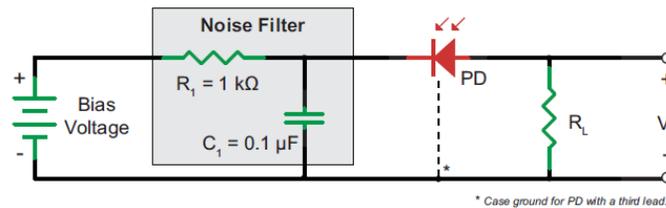


## FOTODETECTOR InGaAs FGA04

### Specifications

Specification	Value	Specification	Value
Wavelength Range	800 - 1800 nm	Sensor Material	InGaAs Pin
Active Area	Ø100 µm (7.8 mm <sup>2</sup> )	<b>Max Ratings</b>	
Rise/Fall Time (R <sub>L</sub> =50 Ω, 5 V)	0.1 ns Min	Damage Threshold CW	70 mW
NEP, Typical (1550 nm)	1.5 x 10 <sup>-15</sup> W/Hz <sup>1/2</sup>	Max Bias (Reverse) Voltage	25 V
Dark Current (5 V)	0.5 nA Typ. (1.0 nA Max)	Operating Temperature	-40 to 85 °C
Capacitance (5 V)	1.0 pF Typ. (1.2 pF Max)	Storage Temperature	-40 to 125 °C
Package	TO-46 (mod) w/ FC/PC Bulkhead Connector	Reverse Current	10 mA
		Forward Current	10 mA

### Recommended Circuit Diagram



E. E. Antúnez Cerón (2011). "Determinación de la concentración de LiBr en soluciones de LiBr-H<sub>2</sub>O mediante las técnicas ópticas de transmitancia/absorbancia e interferencia multimodos". Tesis de Maestría, UAEM – CIICAp.



## SYLGARD 184 SILICONE ELASTOMER KIT

### Typical Properties:

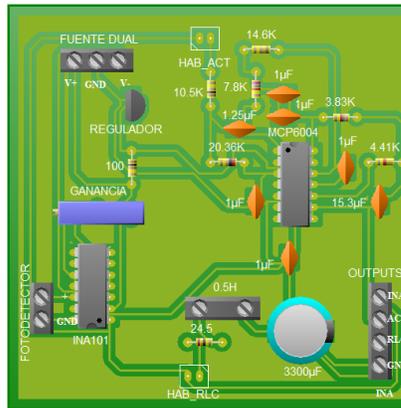
Color = Clear

Dielectric Constant at 100 kHz = 2.65

Dissipation Factor at 100 kHz < 0.001  
Durometer - Shore A = 50 Shore A  
Dynamic Viscosity = 3900 Centipoise  
Flowable  
Heat Cure 10 Minutes @ 150 Deg C  
Heat Cure 20 Minutes @ 125 Deg C  
Heat Cure 45 Minutes @ 100 Deg C  
Hydrophobic  
Mix Ratio 10:1 Base to Catalyst 87-RC  
Room Temperature Cure - Hours = 48 Hours  
Shelf Life = 720 Days  
Specific Gravity @ 25C = 1.03  
Temperature Range -45 Deg C to 200 Deg C  
Thermal Conductivity = 0.16 Watts per meter K  
UL 94 V-0 @ 8.4 mm thickness  
UL 94 V-1 @ 6.0 mm thickness  
Volume Resistivity = 1.2e+014 ohm-centimeters  
Water Resistant  
Working Time > 120 Minutes  
<http://www.dowcorning.com/applications/search/default.aspx?r=131en>

### **CIRCUITO AMPLIFICADOR**

Se muestra el PCB (Printed Circuit Board) de la tarjeta para soldar los diferentes dispositivos electrónicos y completar la implementación de los circuitos de respuesta en voltaje [29].



**Figura A1** Diagrama esquemático de la tarjeta electrónica con los tres circuitos de instrumentación para respuesta en voltaje (INA, ACT y RLC).

En esta tarjeta electrónica se implementaron tres circuitos de instrumentación para caracterizar la respuesta en voltaje con ambas técnicas ópticas (Transmitancia y MMI):

- Circuito de Amplificador de Instrumentación INA101.
- Circuito de Instrumentación INA101 y Filtro Activo abreviado con las iniciales ACT (pasa-bajas, con frecuencia de corte de 10 Hz).
- Circuito de Instrumentación INA101 y Filtro RLC(pasa-bajas, frecuencia de corte de 4 Hz), abreviado como RLC.



## **SENSOR DE PRESION KELLER**

**MODELO PAA-23S/4MPa**

<http://www.keller-druck.es/es/empresa>