



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño, manufactura y
caracterización de un sensor blando
basado en guía de onda**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Leonardo Anuar Flores Hernández

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Alberto Caballero Ruiz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Agradecimientos.

El primer agradecimiento es para mis padres: Santa y José. Gracias por ser mis primeros y más grandes maestros. Gracias por siempre apoyarme en mis proyectos y por enseñarme, entre muchas otras cosas, que para conocer la verdad siempre tienes que conocer los extremos, porque todas las verdades son medias verdades. Gracias por enseñarme que uno de los mayores tesoros que puede tener cualquier ser, es tener a alguien con quién compartir la existencia. Gracias por enseñarme la definición de amor, no con palabras, sino con acciones.

Agradezco a mis hermanas: Bere y Sarahí. Porque a pesar de que siempre hay enojos, discusiones y debates, siempre están ahí para hacer bromas, risas y festejos. Nada puede existir sin su opuesto. Gracias por ayudarme a comprender su perspectiva del universo. Estoy seguro que si no las hubiera conocido, mi vida sería menos divertida.

Gracias en general a toda mi familia, por todo su apoyo y por los buenos momentos que hemos compartido.

Agradezco al doctor Alberto Caballero, por ser uno de mis profesores, por todo su apoyo y por guiarme para terminar el presente trabajo (...). Una de las frases que siempre recordaré de él es la siguiente: *"Lo que no se define, no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede controlar. Lo que no se controla, no se puede mejorar. Lo que no se mejora se degrada siempre."*

Agradezco al doctor Víctor Villela, por ayudarme a confirmar que la filosofía es la única que puede hacer cambiar realmente tu forma de pensar. Una de las frases que siempre recordaré de él es la siguiente: *"Para seguir aprendiendo necesitamos dos elementos: orden y disciplina. El orden es establecer qué es lo que vamos a hacer y cómo lo vamos a hacer. La disciplina es simplemente que el orden se ejecute y se repita. Con estos dos elementos se puede conseguir la armonía."*

Gracias a todos los maestros que me enseñaron directa o indirectamente, por regalarme un poquito de su esencia a través del conocimiento.

Gracias a todas las personas que conocí, conozco y conoceré, porque con cada una de sus acciones, buenas o malas, me han ayudado a ver cada vez más claramente la verdad. Haciendo analogía, en la oscuridad, no sería posible encontrar el camino si de vez en cuando no te dieras algún golpe. Gracias también por ayudar a darme cuenta que lo único que le da sentido a la existencia es este momento, es decir, la experiencia.

“Busca y encontrarás...”

1. ANTECEDENTES	6
1.1 Robótica blanda	7
1.1.1 Habilidades de los robots blandos	7
1.1.2 Saltar	8
1.1.3 Movimiento peristáltico	8
1.1.4 Movimiento subacuático por extremidades	9
1.1.5 Nadar por medio de impulsos	9
1.1.6 Movimiento a través de crecimiento	10
1.1.7 Autocuración	11
1.2 Primeros desarrollos de los materiales blandos	11
1.2.1 Geles	12
1.2.2 Polímeros conductores	12
1.2.3 Elastómeros	13
1.2.4 Nanotubos de carbono (CNT)	13
1.2.5 Bio-transductores	13
1.3. Actuadores blandos	15
1.3.1 Actuadores eléctricos	16
1.3.1.1 Elastómeros dieléctricos	16
1.3.1.2 Elastómeros de injertos electrostrictivos	17
1.3.1.3 Papel electrostrictivo	17
1.3.1.4 Polímeros ferroeléctricos	18
1.3.1.5 Geles poliméricos iónicos (IPG)	18
1.3.1.6 Compuestos metálicos de polímeros iónicos (IPMC)	18
1.3.1.7 Actuadores de polímeros conductores (CP)	19
1.3.1.8 Nanotubos de carbono (CN)	19
1.3.2 Actuadores magnéticos	20
1.3.3 Actuadores térmicos	23
1.3.4 Actuadores neumáticos	24
1.3.5 Actuadores fotosensibles	28
1.4 Sensores blandos	30
1.4.1 Sensores resistivos	30
1.4.2 Sensores capacitivos.	34
1.4.3 Sensores ópticos	35
1.4.4 Sensores magnéticos	37
1.4.5 Sensores inductivos.	40
1.4.6 Sensores blandos aplicados a la robótica blanda.	41
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	44
2.1 Marco teórico	45
2.1.1 Principio de Huygens	45
2.1.2 Principio de Fermat	46
2.1.3 Transmisión y el índice de refracción	47
2.1.4 Reflexión	47
2.1.5 Refracción	48
2.1.6 Fibras ópticas	51

2.1.7 Apertura numérica	52
2.1.8 Principio de Beer-Lambert	54
2.1.9 Sensores ópticos	54
2.1.10 Guías de onda	57
2.1.11 Tipos de manufactura	58
2.1.11.1 Moldeo	58
2.1.11.2 Manufactura por refuerzos	60
2.1.11.3 Manufactura aditiva.	61
2.1.11.4 Bonding	62
3. DESARROLLO	64
3.1 Diseño y manufactura del sensor	64
3.2 Acondicionamiento y digitalización de la señal	73
3.3 Diseño de interfaz de usuario	78
4. PRUEBAS Y RESULTADOS	81
3.4.1 Compresión	82
3.4.2 Tracción	89
3.4.3 Curvatura	96
3.4.4 Histéresis	103
CONCLUSIONES	106
TRABAJO A FUTURO	107
REFERENCIAS	108
ANEXOS	112
Anexo 1	112
Anexo 2	121
Anexo 3	123
Anexo 4	127

1. ANTECEDENTES

Para comenzar a abordar el tema de la robótica blanda, primero tendríamos que definir el concepto de robótica. *La robótica* se puede considerar como el área del conocimiento que estudia el diseño, construcción, funcionamiento y aplicación de robots, así como de los sistemas computacionales para su control, retroalimentación sensorial y procesamiento de información. *Un robot* puede ser definido como una máquina cuyo propósito es sustituir al ser humano en la ejecución de una tarea, tanto desde el punto de vista de actividad física como en la toma de decisiones [1]. En la actualidad se pueden encontrar dispositivos robóticos en casi cualquier lugar desempeñando diferentes funciones. Estos los podemos encontrar en dispositivos simples como juguetes, hasta en sistemas más complejos como los robots armadores, seleccionadores y robots de búsqueda y rescate. Los robots convencionales han aportado en gran medida al desarrollo tecnológico, ya que son capaces de realizar tareas que requieren gran precisión y velocidad, además de que han reemplazado a los humanos en la realización de tareas repetitivas, lo cual volvió los procesos más eficientes. Sin embargo, los robots convencionales tienen algunas desventajas, como las que podrían ser el número limitado de sus grados de libertad para llevar a cabo un movimiento y el peligro que implica la interacción del robot con el usuario, debido a la potencia con la que realizan sus movimientos y la rigidez de sus componentes. Para resolver estas y otras problemáticas presentes en los robots convencionales, los investigadores empezaron a centrar su atención en el comportamiento de los organismos vivos, con la premisa de que la naturaleza, después de miles de años de evolución, ha logrado resolver problemas complejos que los ingenieros de la actualidad no han logrado resolver. Al aplicar los descubrimientos basados en el estudio del comportamiento de los organismos vivos a la robótica, se creó robótica blanda. Podríamos definir a *la robótica blanda* como el subcampo de la robótica que se enfoca en el desarrollo de robots a partir de materiales altamente deformables, similares a los que se encuentran en los organismos vivos, con el fin de resolver problemáticas aplicando los conocimientos generados a partir del estudio de la naturaleza. Contrario a lo que se podría pensar, la robótica blanda no se fue desarrollando de forma directa al desarrollo de la robótica convencional, debido al tipo de materiales que se necesitan para su desarrollo, y al hecho de que la respuesta final del actuador depende en gran medida de la geometría, estos fueron avanzando conforme se fueron descubriendo nuevos materiales y métodos de manufactura. Actualmente podemos encontrar robots blandos especializados en realizar gran cantidad de tareas, principalmente en las áreas del estudio de la fisiología de diferentes organismos y en la rehabilitación. Para el caso de la industria, podemos decir que desde hace algunas décadas se han estado considerando a los *actuadores blandos* para su implementación en algunos elementos de maquinaria, como es el caso de los músculos neumáticos.

Actualmente las aplicaciones de dispositivos blandos en la industria se han orientado en la generación de robots híbridos, los cuales son sistemas rígidos que utilizan actuadores blandos como manipuladores finales para dar a los robots convencionales la capacidad de manejar objetos sin dañarlos. A pesar de que han habido grandes desarrollos en la robótica blanda, ésta es un área del conocimiento relativamente nueva y se encuentra en pleno desarrollo. Para empezar a entender estos dispositivos, primero daremos algunas definiciones y mencionaremos algunas de las habilidades que se han podido desarrollar.

1.1 Robótica blanda

El término “Robótica blanda” fue usado formalmente por primera vez para hacer referencia a los robots con elementos rígidos y uniones mecánicamente adaptables con suavidad variable [2]. En la actualidad el término se aplica a un conjunto más amplio, sin embargo, esta primera definición ya comenzaba a hacer referencia a las ventajas que se podrían obtener al incluir elementos blandos en los sistemas robóticos. Algunas definiciones de robótica blanda encontradas en la literatura podrían ser las siguientes: “Robots continuos hechos de materiales blandos que pueden ser sometidos a deformaciones continuas y producir movimiento a través de la generación de curvas de un arreglo de elementos [3], [4]”, “Los robots blandos son dispositivos que pueden interactuar activamente con el ambiente y pueden ser sometidos a grandes deformaciones, confiando en su inherente complianza estructural [5]”, o también pueden ser definidos en función de su módulo de elasticidad como “Los robots blandos son sistemas que son capaces de presentar un comportamiento autónomo y que son principalmente compuestos por materiales con un módulo de elasticidad en el rango de dureza de los materiales biológicos [6]”, etc. Analizando las diferentes definiciones y relacionando los concepto que tienen en común, podemos definir a los robots blandos como *sistemas autónomos que están compuestos con materiales altamente deformables, con suavidades similares a los materiales biológicos, los cuales son capaces de experimentar deformaciones continuas, y son diseñados para resolver problemáticas por medio del estudio de la biomimética.*

Como la definición lo indica, los robots blandos fueron diseñados por primera vez para tratar de subsanar las deficiencias que se presentan en la robótica convencional, como puede ser la falta de redundancia el movimientos del sistema y el escaso grado de libertad. Adicionalmente, estos robots fueron ideados para tener una interacción más amigable con los humanos, y así minimizar los posibles daños a los operadores o al medio con el que interactúan. Sin embargo, este tipo de robots también presentan desventajas en comparación con su contraparte rígida, como puede ser el aumento en la complejidad de los algoritmos de control, el diseño de sensores especializados y menor precisión.

Para aprovechar las ventajas de los dos tipos de robótica, es común encontrar en la industria sistemas robóticos que combinan estos dos tipos de tecnología. A los robots que combinan ambos tipos de robots, rígidos y blandos, se les conoce como *Robots híbridos.*

A pesar de que el área de la robótica blanda es relativamente nueva, se han desarrollado actualmente muchas investigaciones en este campo, las cuales han brindado nuevas habilidades a los robots blandos, siendo el principal inconveniente las fuentes de energía o autonomía. A continuación se presentan algunas de las habilidades de los robots blandos que se han logrado desarrollar hasta la actualidad.

1.1.1 Habilidades de los robots blandos

La proliferación de la investigación en robótica blanda en todo el mundo ha traído logros sustanciales en términos de principios, modelos, tecnologías, técnicas y prototipos de robots blandos. El desarrollo de las diferentes habilidades de los robots blandos se dio en gran medida por el desarrollo de nuevos métodos de control, como podría ser la implementación de inteligencia artificial, pero también se dio por medio del desarrollo de diferentes tipos de materiales y su caracterización.

Dentro de las habilidades que se han desarrollado en en el área de la robótica blanda podemos mencionar las siguientes [5]:

- Saltar
- Movimiento peristáltico
- Movimiento subacuático por extremidades
- Nadar por medio de impulsos
- Movimiento a través de crecimiento
- Autocuración

1.1.2 Saltar

Dentro de los robots que tienen la habilidad de saltar, podemos encontrar el robot publicado por Robert F. et. [7], el cual describe un robot compuesto por tres extremidades. Estas extremidades tienen en su parte externa pequeñas cámaras de combustión, las cuales son utilizadas para hacer una explosión por medio de la combustión de algún hidrocarburo, y así producir una liberación rápida de energía para generar el movimiento del robot. A pesar de que este robot tiene la habilidad de desplazarse por medio de saltos, tiene desventajas muy importantes, como son la ausencia de control del desplazamiento, la utilización directa de combustibles, y el posible daño que pueda producir en el robot al ser expuesto a las explosiones. La figura 1a muestra a este actuador en el momento en que se está llevando a cabo el proceso de combustión.

Otro de los robots reportados en la literatura es el diseñado por Huai-Ti Lin et.[8]. El diseño de este robot fue inspirado en un tipo de gusano que es capaz de enrollarse rápidamente para generar un impulso hacia adelante y así poder escapar de sus depredadores. Este robot está hecho de silicón y aleaciones de memoria de forma. Para que el robot pueda generar su movimiento, este tiene que realizar una secuencia de activación de sus actuadores neumáticos para que se contraigan y cambien a una forma “enrollada”.

1.1.3 Movimiento peristáltico

Los movimientos peristálticos han sido muy utilizados por la naturaleza para realizar el movimiento de diferentes cuerpos en una dirección en específico. En los humanos, el movimiento peristáltico (Peristalsis) se puede definir como el proceso por el cual se producen una serie de contracciones y relajaciones radialmente simétricas en sentido anterógrado a lo largo del tubo digestivo y los uréteres [9], sin embargo, podemos observar que algunos organismos utilizan movimientos similares de contracción y relajación de sus músculos para generar un desplazamiento, como es el caso de algunos gusanos u orugas. En el área de la fisiología y la medicina, se han desarrollado actuadores blandos que simulan el comportamiento del esófago, estómago y intestino, para el estudio de algunas enfermedades, y comportamiento y modelado que tienen algunos medicamentos en los órganos [10]. Por otro lado, uno de los ejemplos de robots que utilizan movimientos de contracción y relajación de sus actuadores para generar desplazamiento es el reportado por Wu Pang et. [11]. El robot reportado en este artículo es un arreglo modular de actuadores neumáticos, los cuales a partir de patrones de accionamiento logran su desplazamiento. La figura 1b muestra el diagrama de un simulador esofágico.

1.1.4 Movimiento subacuático por extremidades

Uno de los animales más estudiados para el desarrollo de robots blandos es el pulpo, ya que es un organismo que no contiene una base estructural rígida (Esqueleto) y puede llegar a realizar movimientos con gran precisión. Debido a esto, se han desarrollado robots blandos que pueden imitar el comportamiento de estos animales utilizando diferentes tipos de actuadores. Por ejemplo, M Calisti et. [12] desarrolló un robot blando que es capaz de explorar un entorno subacuático y manipular objetos delicados. El diseño de este tiene la estructura de un pulpo. A pesar de que este robot no está hecho completamente de materiales blandos, los recubrimientos y actuadores finales están hechos de materiales blandos, lo cual lo convierte en un robot híbrido. La figura 1c muestra el diagrama del robot mencionado.

1.1.5 Nadar por medio de impulsos

Al igual que los robots diseñados para tener un movimiento subacuático por extremidades, los robots que son capaces de nadar por medio de impulsos están inspirados en el comportamiento de los cefalópodos. Estos animales utilizan la forma de su cuerpo y sus extremidades para impulsar el agua y generar movimiento.

Dentro de los robots que pueden desplazarse de esta forma, podemos mencionar a los robots que fueron reportados por F Giorgio-Serchi et. [13] [14]. Estos robots utilizan su cuerpo para acumular pequeñas cantidades de agua, la cual será liberada rápidamente para impulsarse por medio de reacción. Los experimentos demostraron una correlación inversa entre la frecuencia de pulsación y la velocidad del robot. Al igual que todos los actuadores blandos, la eficiencia de este robot puede ser mejorada modificando su geometría y los parámetros de diseño. La figura 1d muestra las fuerzas que interactúan en el movimiento de este robot.

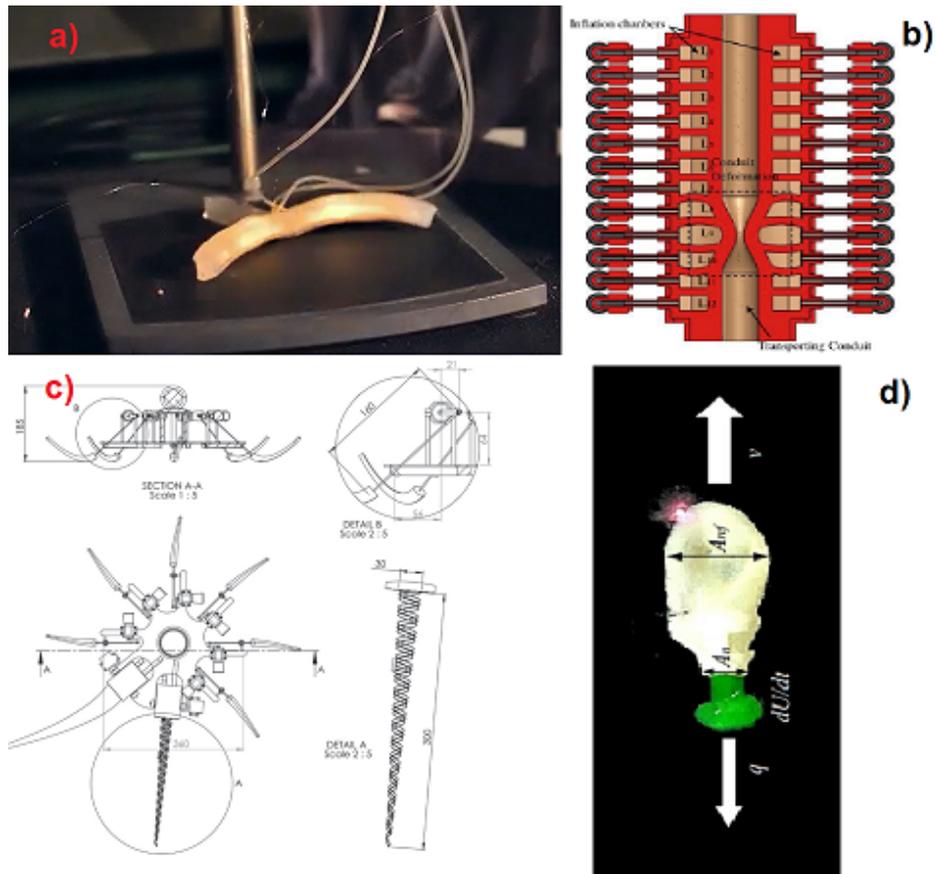


Figura 1. a) Muestra el momento justo en que un actuador realiza una reacción de combustión para saltar [27], b) Muestra un simulador esofágico, el cual genera movimiento por medio de peristalsis [30], c) Muestra algunas vistas del robot pulpo que presenta movimiento subacuático [32], d) Muestra el movimiento generado por reacción de los robots que navegan por medio de pulsos [34]

1.1.6 Movimiento a través de crecimiento

Los robots que son capaces de desplazarse por medio del crecimiento, por lo general, tratan de imitar el comportamiento de las plantas. Por ejemplo, el robot blando reportado por Elliot W. Hawkes et. [15], es un robot neumático que es capaz de navegar su entorno por medio del crecimiento, utilizando un mecanismo de “inversión” de material. El movimiento de inversión es similar a cuando se toma una bolsa de plástico por el fondo y se jala a la parte superior, para que la parte interior ahora se la exterior y viceversa. Este robot también puede controlar la dirección en la que quiere crecer, ya que cuenta una cámara de video para conocer la posición de la cabeza del robot y cámaras neumáticas internas que son presurizadas selectivamente. Este robot puede tener muchas posibles aplicaciones en operaciones de búsqueda y rescate. La figura 2a muestra el mecanismo de avance del robot. Otro ejemplo de este tipo de robot es el reportado por Ali Sadeghi et. [16], el cual es capaz de explorar la parte superficial del suelo de una manera más eficiente que los métodos convencionales.

1.1.7 Autocuración

Existen diferentes materiales poliméricos que pueden ser implementados en la construcción de robots blandos, para aumentar su resistencia a pinchaduras, cortes, e incluso para darles la propiedad de autocuración. Por ejemplo, el actuador blando reportado por Shepherd, Robert F et. [17] es un actuador neumático que es capaz de curvarse internamente o externamente dependiendo de la presión utilizada, pero la característica particular de este actuador es que puede ser perforado superficialmente y seguir funcionando con normalidad, debido a que está compuesto por silicona (*Ecoflex 0030*®) unida a una matriz de poliamida (*Kevlar*®). Otro ejemplo de este tipo de materiales es reportado por Seppe Terry et. [18]. Este material clasificado como polímero “Diels-Alder”, es capaz de recuperar su forma original después de ser pinchado o cortado al ser sometido a un rango de temperatura (Aproximadamente 70 °C). Seppe et. describe diferentes tipos de materiales que tienen la propiedad de autocuración, dentro de los que se encuentran los autónomos y los no autónomos, es decir, los que se curan solos o los que necesitan un estímulo externo. Dentro de los autónomos son mencionados los de encapsulación y los mecano químicos, y dentro de los no autónomos son mencionados los materiales que necesitan un estímulo de calor, luz, mecánica, iónica o química. La figura 2b muestra los diferentes tipos de daños que puede sufrir un actuador blando.

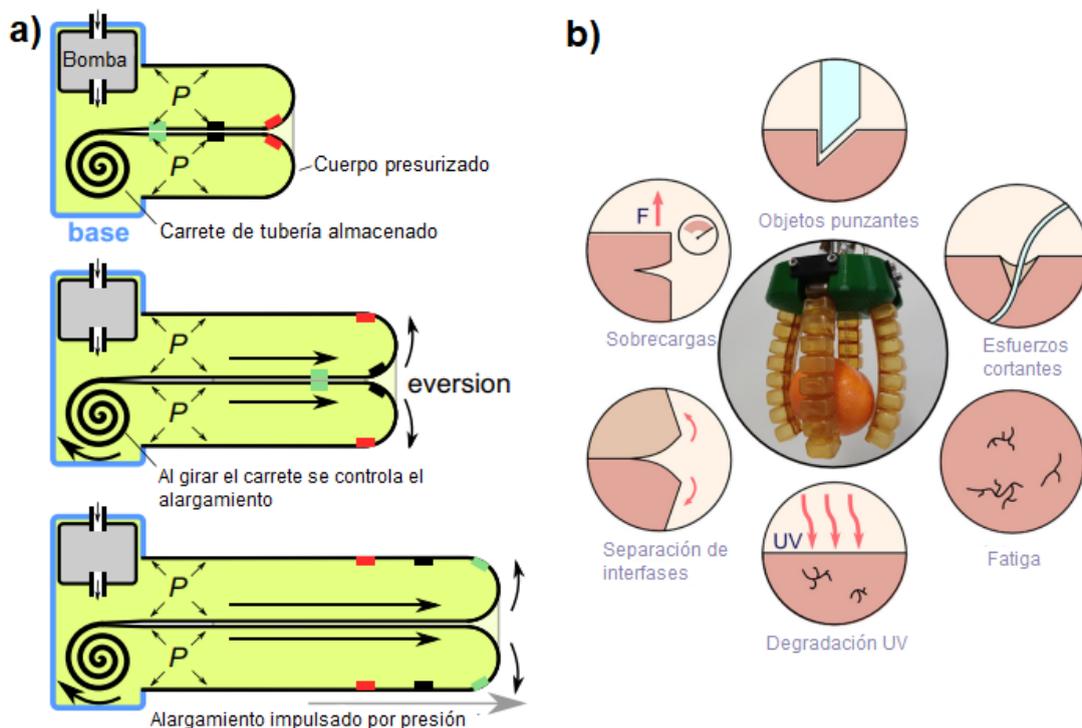


Figura 2, a) Muestra el mecanismo de crecimiento del robot reportado por Elliot W. Hawkes et. [15], b) Muestra los diferentes tipos de daño que puede presentar un robot blando [18]

1.2 Primeros desarrollos de los materiales blandos

En la actualidad, una gran variedad de dispositivos blandos han sido desarrollados para el aprovechamiento de las diferentes ventajas que los materiales blandos nos ofrecen, como puede ser el bajo peso, el bajo costo, poco contaminantes y altas eficiencias cuando estos

se utilizan como músculos artificiales. Sin embargo, este tipo de actuadores no ha tenido un desarrollo tan acelerado, ya que estos actuadores, además de utilizar modelos matemáticos muy complejos para predecir su comportamiento, su desarrollo está estrechamente relacionado con el descubrimiento y desarrollo de materiales que puedan adaptarse a sus características de funcionamiento. Para entender entonces cómo es que se empezaron a desarrollar los dispositivos blandos, es conveniente mencionar los primeros desarrollos en los materiales blandos. Los primeros desarrollos en el área de los materiales blandos se empezaron a presentar cronológicamente de la siguiente manera [19]:

- Geles
- Polímeros conductores (CP)
- Elastómeros
- Nanotubos de carbono (CNT)
- Biomateriales

1.2.1 Geles

Los geles son sistemas coloidales donde la fase continua es sólida y la dispersa es líquida. Un sistema coloidal está conformado por dos o más fases, normalmente una fluida y otra dispersa en forma de partículas, generalmente sólidas y muy finas. Los primeros desarrollos en el campo de los geles transductores se dieron en el año de 1949 [20], cuando se demostró experimentalmente que geles compuestos químicamente por iones carboxilato, eran capaces de producir un desplazamiento al ser expuestos a diferentes tipos de ácido. Más adelante se concluyó que se podía controlar los proceso de hinchazón del gel agregando sustancias ácidas o alcalinas.

Este fenómeno se debe a las fuerzas de repulsión y atracción electrostáticas que existen entre las moléculas presentes en los diferentes tipos de sustancias y su interacción con el gel.

Más adelante se desarrollaron otro tipo de transductores en gel:

- Electro-sensibles (1965) [21]
- Geles sensibles a la sal (1966) [22]
- Geles sensibles a solventes (1970) [23]
- Foto-sensibles (1970) [24]
- Termo-sensibles (1977) [25]
- Magneto-sensibles (1996)

1.2.2 Polímeros conductores

Los polímeros conductores son compuestos orgánicos capaces de conducir corriente eléctrica. Estos transductores muestran un cambio dimensional como resultado de un dopaje electroquímico, caracterizado por el transporte de iones disueltos en el interior de la matriz del polímero y la solución electrolítica de los alrededores, repulsión electrostática o la distorsión estructural causada por reacciones de redox. A pesar de que los primeros polímeros conductores se empezaron a desarrollar aproximadamente en el año de 1970, los primeros desarrollos en transductores de polímeros conductores se dieron a conocer en el

año de 1991 [26], cuando se observó que algunos de estos polímeros presentaban un cambio de volumen al aplicar una corriente eléctrica.

1.2.3 Elastómeros

Los elastómeros son materiales que pueden deformarse al aplicarles una fuerza y volver a su forma original al retirar dicha fuerza. Dentro de los dispositivos blandos hechos de elastómeros podemos encontrar a los neumáticos, los que son operados por campo eléctrico (Elastómeros dieléctricos), y los operados por luz. Los primeros desarrollos en dispositivos blandos hechos con elastómeros fueron los llamados músculos neumáticos o músculos McKibben, en el año 1960 [27]. Los músculos neumáticos son muy utilizados actualmente en la industria para la automatización de procesos. Por otro lado, para el caso de los elastómeros dieléctricos, se empezaron a realizar experimentos sometiendo una película de poliuretano a un campo eléctrico para analizar su comportamiento en el año 1996 [28]. Los primeros descubrimientos de actuadores suaves hechos de elastómeros manejados por luz se dieron en el año 2003, cuando se logró integrar moléculas de azobenceno en una red polimérica [29].

1.2.4 Nanotubos de carbono (CNT)

Se denominan nanotubos a estructuras tubulares cilíndricas cuyo diámetro es del tamaño del nanómetro. Dependiendo del grado de enrollamiento, y la manera como se conforma la lámina original, el resultado puede llevar a nanotubos de distinto diámetro y geometría interna [30]. Los primeros descubrimientos en el área de este tipo de transductores fue reportado en el año 1999, cuando se reportó un material hecho de nanotubos de carbono de pared simple, el cual era capaz de presentar cambios de volumen, similares a los cambios producidos en los polímeros conductores, pero con la particularidad de que este no requería la adición de algún dopante para su funcionamiento [31]. Estos actuadores, al igual que los músculos naturales, contienen un arreglo de nanofibras formadas por los nanotubos de carbono. Los cambios de volumen en este tipo de transductores se dan por medio de la inserción de electrones y el transporte iónico.

1.2.5 Bio-transductores

Como ya se ha estudiado, el cuerpo de diferentes organismos biológicos cuenta con estructuras proteicas para realizar las diferentes funciones fisiológicas y mantener el equilibrio. Algunas moléculas que son capaces de realizar trabajo son las kinesinas, la estructura ATP sintetasa, la bomba sodio potasio, entre otras. Con base en el funcionamiento de estas estructuras, los investigadores han tratado de desarrollar estructuras orgánicas que simulan su comportamiento. Uno de estos desarrollos son los bio transductores. Los primeros desarrollos de bio transductores se dieron en el año 2000, los cuales estaban compuestos por medio de la combinación de tres principales componentes: Un sustrato artificial, una biomolécula motor de (F-ATPase), y nano hélices artificiales [32]. La molécula F-ATPase tiene la función de ensamblar las moléculas de ATP a partir de ADP en el proceso de respiración celular. Para esto, esta molécula realiza un

movimiento de rotación, por lo cual podemos decir que es un motor biológico. Al igual que estas moléculas, las proteínas de los músculos esqueléticos, es decir, las proteínas de miosina y actina, son capaces de generar un desplazamiento lineal a lo largo de las cadenas poliméricas cuando son expuestas a ATP.

Gracias al estudio de estas proteínas, los investigadores han logrado desarrollar una gel que presenta una respuesta de contracción cuando es expuesto a ATP [33]. De la misma manera, se han utilizado diferentes tipos de células para crear actuadores, como es el caso de chips hechos de hidrogeles con células cardiacas [34].

La figura 3 muestra de forma gráfica los primeros desarrollos en los diferentes materiales blandos.

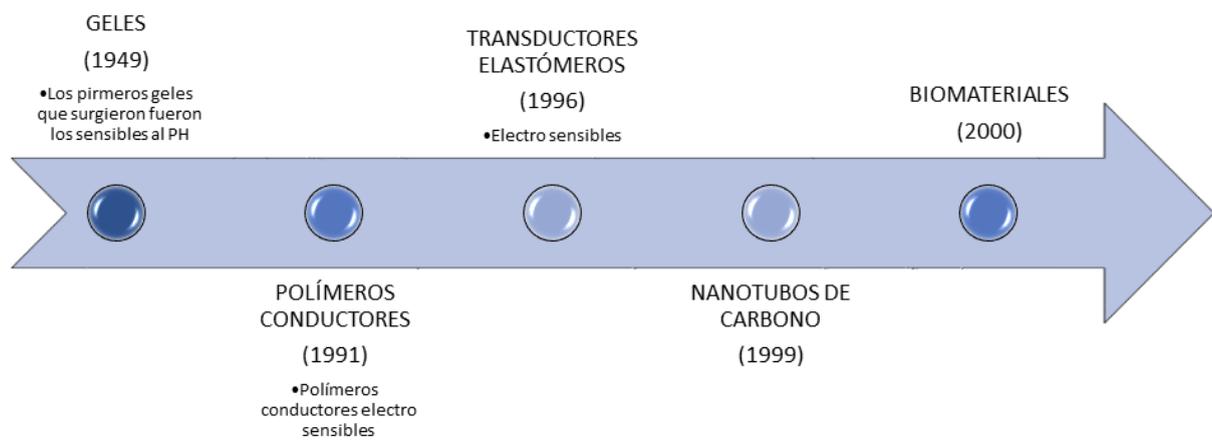


Figura 3. Muestra la línea del tiempo del desarrollo de transductores blandos

Ya que vimos algunas de las habilidades que se han desarrollado en los robots blandos y los primeros desarrollos de los materiales blandos, es conveniente explicar cómo está conformado un robot blando para que empecemos a desarrollar cada una de sus partes. Un robot blando está compuesto por los mismos módulos que componen a un robot convencional. Los módulos que conforman a un sistema robótico convencional (Al igual que la mayoría de los sistemas con control automático), de manera abstracta, es el módulo de control; el módulo de actuación, el cual comúnmente se le conoce como planta; y el módulo de medición o supervisión, en el cual se encuentran los sensores. En general, la única diferencia entre un robots blandos y uno convencional, es que los robots blandos utilizan actuadores blandos, y, recientemente ya se han empezado a implementar en mayor cantidad los sensores blandos para la adquisición de señales en el módulo de medición. La figura 4 muestra los módulos presentes en un robot blando.

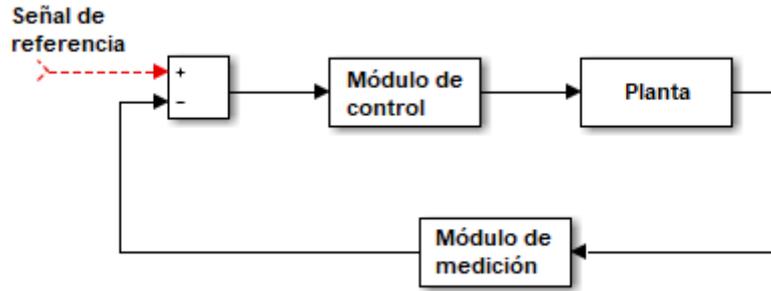


Figura 4. Muestra de forma abstracta los módulos que componen a un sistema robótico.

A continuación desarrollaremos los temas de actuadores blandos y sensores blandos, los cuales son los componentes principales del módulo correspondiente a la planta y al módulo de medición respectivamente.

1.3. Actuadores blandos

Un actuador puede ser definido como un dispositivo capaz de modificar el estado de una variable física o de un elemento dentro de su entorno. Basándonos en esta definición y en las características que tienen los dispositivos blandos, podemos decir que *un actuador blando es un actuador que está hecho con materiales altamente deformables, los cuales tienen dureza similar a los tejidos presentes en los seres vivos.*

Al igual que los actuadores convencionales, los actuadores blandos pueden ser clasificados por su principio de operación, es decir, la variable física con los que son operados (presión, luz, electricidad, etc), o por su principio de funcionamiento, es decir, el tipo de proceso que sigue para su funcionamiento. Por conveniencia, para describir los diferentes tipos de actuadores blandos, se clasifican por su principio de operación. Dentro de los principios de operación presentes en los actuadores blandos podemos mencionar los que tienen una respuesta a estímulos eléctricos, magnéticos, fotosensibles, térmicos, neumáticos, sensibles al Ph, sensibles a la salinidad y los sensibles a la humedad; sin embargo, en este caso solo desarrollaremos los actuadores que tienen más aplicaciones potenciales en el área de la ingeniería, los cuales son los cinco primero antes mencionados [19]. La figura 5 muestra los principios de operación de los actuadores blandos que se presentaron:

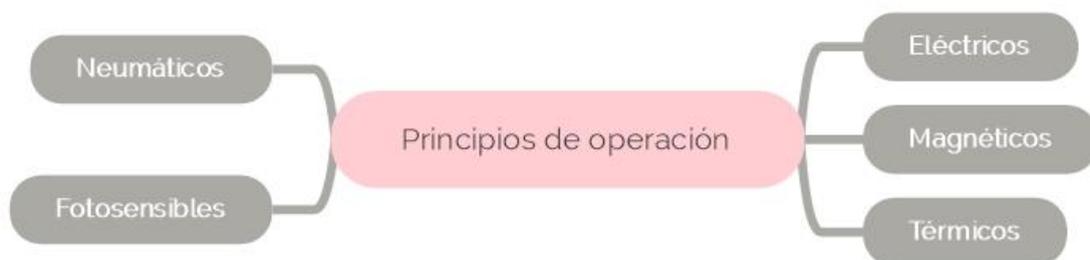


Figura 5. Muestra los principios de operación de los actuadores blandos con más aplicaciones potenciales en ingeniería [19], [35]

1.3.1 Actuadores eléctricos

Todos los polímeros que presentan un cambio de forma o tamaño en respuesta de un estímulo eléctrico son llamados polímeros electroactivos (Electroactive polymers EAP) y son clasificados en función del mecanismo responsable de la actuación. Dependiendo del principio de funcionamiento, los EAP pueden ser clasificados en *EAP electrónicos* y *EAP iónicos*. La figura 6 muestra los diferentes tipos de EAP con su respectiva clasificación [35].

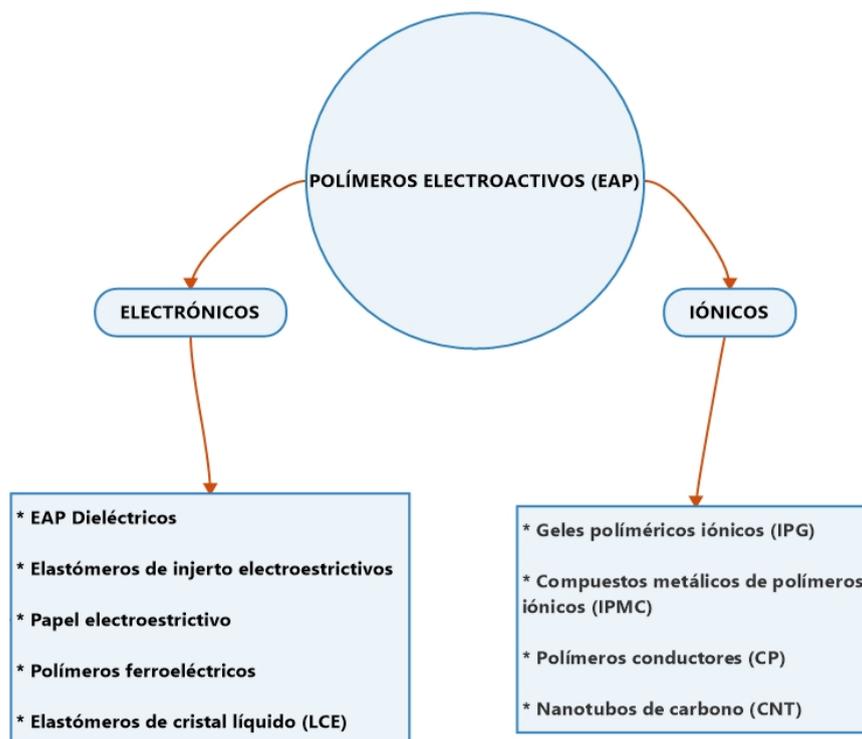


Figura 6. Muestra la clasificación de los diferentes polímeros electroactivos (EAP)

Los polímeros electroactivos (EAP) electrónicos, con excepción de los elastómeros de cristal líquido, generalmente requieren campos eléctricos muy altos para su activación ($>150\text{V}/\mu\text{m}$), los cuales están muy cerca del campo eléctrico de ruptura del material. Por otro lado, los polímeros electroactivos iónicos, requieren voltajes bajos para ser manejados. Estos pueden ser manejados en un rango de voltaje de entre 1 - 5 [v]. Sin embargo, estos últimos tienen una respuesta mucho más lenta en comparación con sus complementarios.

1.3.1.1 Elastómeros dieléctricos

Los elastómeros dieléctricos son unos de los actuadores con más aplicaciones potenciales en el área de la ingeniería. Algunas de las aplicaciones que se le han dado a este tipo de actuadores se encuentran en los músculos artificiales, sensores y actuadores acústicos, dispositivos ópticos de estado sólido, bombas, Displays, etc.

Este tipo de actuadores tienen un principio de funcionamiento muy simple: la fuerza de atracción electrostática. Los Elastómeros dieléctricos (DE) por lo general están formados de

un elastómero y dos electrodos con la capacidad de expandirse. Los electrodos comúnmente están hechos de materiales a base de grasas de carbono o semiconductores en estado coloidal. Estos electrodos se colocan en la parte superior e inferior del elastómero para formar una especie de sandwich. Entonces, cuando se energizan los electrodos con alto voltaje (~ 2.5 KV), las cargas presentes en los electrodos son atraídas entre sí, lo cual genera una fuerza que comprime al elastómero de forma transversal a los electrodos y una expansión longitudinal. La figura 7 ilustra el movimiento del actuador.

Este arreglo también puede ser utilizado como sensor, ya que al ejercer una presión sobre el actuador, este presenta una diferencia de potencial proporcional a la presión ejercida.

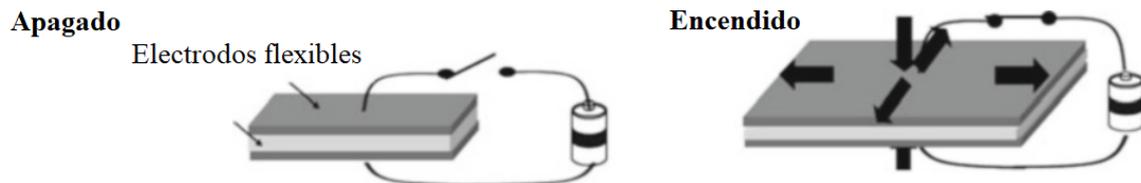


Figura 7. Muestra el funcionamiento de un arreglo simple de un elastómero dieléctrico [19]

1.3.1.2 Elastómeros de injertos electrostrictivos

Este tipo de actuadores consisten en dos tipos de componentes, un polímero flexible de cadena larga y un injerto de grupo cristalino. El injerto de grupo cristalino provee dos funciones: sitios de entrecruzamiento para el sistema de elastómeros, y restos polares como contribuyentes intrínsecos a la respuesta electrostrictiva del elastómero a un campo eléctrico aplicado. Las películas de este tipo de actuadores son hechas por medio de vaciado. Al igual que los actuadores de elastómeros dieléctricos, estos actuadores son operados por medio de campos eléctricos y presentan un respuesta de deformación. Sin embargo, estos actuadores tienen deformación relativamente baja en comparación con los elastómeros dieléctricos ($\sim 4\%$ de elongación). Para que este actuador sea más eficiente, generalmente es combinado con polímeros piezoeléctricos [36].

1.3.1.3 Papel electrostrictivo

El primer actuador de este tipo fue hecho con dos láminas delgadas de plata pegadas en una hoja de papel. Las dos láminas de plata funcionan como electrodos y el papel funciona como material dieléctrico. Como nos podremos dar cuenta, este actuador tiene la estructura de "Sándwich" que se presenta en los elastómeros dieléctricos y los elastómeros de injertos electrostrictivos, sin embargo, este tipo de actuadores presenta un respuesta de "Curvatura", al ser expuestos a un campo eléctrico. Este actuador en específico tiene ciertas desventajas, como pueden ser la magnitud de la respuesta (desplazamientos muy pequeños), altos voltajes de excitación, sensibilidad a la humedad, y una rápida degradación. El funcionamiento de este actuador es principalmente causado por el efecto

piezoeléctrico y el efecto de migración de iones asociados al momento dipolar del papel [35]. [19]

1.3.1.4 Polímeros ferroeléctricos

El material polimérico más utilizado para la creación de este tipo de actuadores es el Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) (P(VDF-TrFE)). Este material, debido a la alta electronegatividad del flúor, crea dipolos locales en la cadena polimérica.

Para entender mejor el principio de funcionamiento de este actuador, primero explicaremos el fenómeno de la ferroelectricidad. La ferroelectricidad es análoga al ferromagnetismo en los metales. Los materiales ferroeléctricos, al ser expuestos a un campo eléctrico, son capaces de alinear sus moléculas para crear dominios eléctricos. Entonces, cuando el campo eléctrico es retirado, estos conservan la orientación de sus moléculas, y, por lo tanto, el campo eléctrico. Este actuador tiene la capacidad de deformarse en función de la dirección del campo eléctrico al que está siendo expuesto. Sin embargo, al igual que los actuadores de papel electrostático, estos actuadores necesitan altos voltajes y su respuesta de salida es muy pequeña (130 [MV/m] produce una deformación ~ 4.5%) .[37]

1.3.1.5 Geles poliméricos iónicos (IPG)

Los geles de polímeros iónicos fueron descubiertos por primera vez al observar que ciertos tipos de geles poliméricos presentaban un cambio de forma en función de la acidez. Los primeros actuadores que se desarrollaron eran controlados por medio de la acidez de las sustancias a la que era expuesta. Sin embargo, los cambios de Ph de la solución a la que era expuesta el actuador provocan inevitablemente una reacción química en la que se tenían como productos sales, las cuales modificaban el tiempo de reacción del actuador. La respuesta de este tipo de actuadores a un estímulo eléctrico fue estudiada por primera vez en 1982 por Tanaka et al. [38] en geles poliacrílicos ácidos. Este tipo de geles también tienen una reacción a los cambios de acidez, sólo que los cambios de acidez de la solución acuosa donde se encuentra el actuador ya no es modificada agregando otra sustancia química, sino que es controlada por la electrólisis de agua. Las primeras configuraciones para que este actuador tuviera una respuesta de curvatura fueron observadas por Shiga and Kurauchi en 1990 [39]. El actuador presenta una contracción del lado del cátodo y una expansión del lado del ánodo, lo cual produce una respuesta de curvatura. Una de las desventajas de este actuador es la baja velocidad de respuesta.

1.3.1.6 Compuestos metálicos de polímeros iónicos (IPMC)

Los actuadores de compuestos metálicos de polímeros iónicos fueron estudiados por primera vez en el año de 1992, cuando descubrieron que un compuesto de polielectrolito-membrana- electrodo, en la cual la membrana estaba hecha de sulfatos perfluorados cubierta con una capa de platino en ambos lados de la membrana era capaz de deformarse y doblarse cuando se le aplicaba un voltaje pequeño (~1-5[v]), cuando estaba en un ambiente acuoso. Este actuador, como la mayoría de los actuadores de polímeros electroactivos iónicos, funciona por medio del transporte de iones. Al ser energizado el actuador, se lleva a cabo un cambio en la concentración de iones de diferentes cargas en cada uno de los electrodos, lo cual provoca una respuesta de atracción (Hidrofóbica) o

repulsión (Hidrofóbica) de las moléculas de agua. Esta diferencia en el comportamiento de las moléculas de agua es lo que provoca que el actuador se deforme. Este actuador, al igual que los geles poliméricos iónicos, siempre tiene que estar en ambientes acuosos.

1.3.1.7 Actuadores de polímeros conductores (CP)

Los polímeros conductores, también llamados polímeros conjugados, son materiales orgánicos que son capaces de conducir la electricidad. En el mercado, actualmente se pueden encontrar muchos tipos de estos conductores. Los actuadores de polímeros conductores consisten en dos tiras de material de polímero conductor y un electrolito. El electrolito quedará en medio de las dos tiras de material de polímero conductor para formar una configuración de sandwich. Las tiras de polímero conductor actúan como electrodos en las celdas electroquímicas. Cuando este actuador es energizado, se empieza a llevar a cabo un proceso de óxido-reducción. La oxidación ocurre en el ánodo y la reducción en el cátodo. Entonces, para balancear los cambios de carga, los iones son transferidos dentro y fuera del polímero y del electrolito. La expansión ocurre cuando hay una adición de iones, y la contracción ocurre donde hay una remoción de iones. Esta expansión y contracción en los electrodos del actuador son lo que produce la respuesta de curvatura. El funcionamiento de este actuador no depende de estar en un ambiente acuoso como los dos actuadores antes mencionados [35].

1.3.1.8 Nanotubos de carbono (CN)

Los primeros actuadores de nanotubos de carbono fueron desarrollados en el año de 1999. Dependiendo del grado de enrollamiento de los nanotubos de carbono, y la manera en la que se conforman como láminas, este tipo de materiales presentan diferentes propiedades. Dentro de los tipos de estructura en nanotubos de carbono tenemos las siguientes: pared simple, pared múltiple, Taurus, Nanoyema, Tridimensionales, Grafenados, Dopados de nitrógeno, Vaina. La configuración más utilizada para la construcción de actuadores de nanotubos de carbono es la de pared simple, ya que la eficiencia de su respuesta depende ampliamente de la superficie de carga. Los primeros desarrollos de este tipo de actuadores se dieron cuando se observó deformación en nanotubos que estaban suspendidos en un electrolito. El cambio en la longitud del enlace, debido a la inyección de grandes cargas en los nanotubos se considera responsable de la deformación observada. En un nanotubo de carbono, la ruta del flujo de electrones la proporciona una red de enlaces conjugados que conectan los átomos de carbono. Los electrolitos forman una doble capa eléctrica alrededor de los nanotubos, creando un desequilibrio iónico entre los nanotubos y los electrolitos. La longitud del enlace C-C también aumenta debido a la repulsión entre los átomos de carbono cargados positivamente formados por la eliminación de electrones. Estos cambios dimensionales se traducen en una deformación macroscópica en una red de nanotubos entrelazados [35] [31].

La figura 8 muestra de forma resumida las ventajas y desventajas de estos tipos de polímeros electroactivos

Actuadores de polímeros electroactivos (EAP)

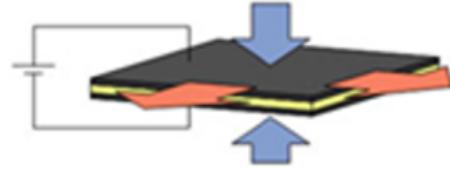
EAP electrónicos

Principio de operación: *Fuerzas de Coulomb*

Voltajes de trabajo: *Altos (>1 [kV])*

Condiciones de trabajo: *Secas*

Tiempo de respuesta: *Bajos (Rápidos)*



EAP iónicos

Principio de operación: *Transporte de iones (Migración o difusión)*

Voltajes de trabajo: *Bajos (< 5 [V])*

Condiciones de trabajo: *Humedas*

Tiempo de respuesta: *Altos (Lentos)*

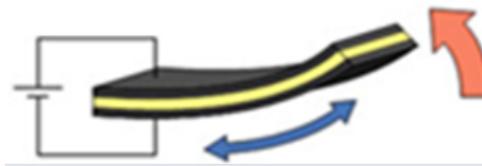


Figura 8. Muestra las principales diferencias entre los actuadores de polímeros electroactivos (EAP) [35]

1.3.2 Actuadores magnéticos

Dentro de los sensores blandos magnéticos utilizados en la actualidad, podemos encontrar los que tienen en su composición principal pequeñas partículas magnéticas dispersas en una matriz de material polimérico altamente elástico. Estas partículas son capaces de reaccionar a los campos magnéticos externos. Debido a que las partículas están adheridas a la matriz polimérica, todas las fuerzas de acción sobre las partículas son transferidas directamente a la cadena polimérica, resultando así en un movimiento o una deformación. Al combinar los efectos de la distribución de las partículas magnéticas y las propiedades estáticas de la matriz polimérica, se pueden lograr respuestas muy complejas [40]. En la actualidad existen diferentes tipos de actuadores blandos magnéticos, pero en general, todos tienen el mismo principio de funcionamiento. El diseño de la forma y “programación” de estos actuadores es muy importante, ya que estas variables influyen en gran medida en el comportamiento del actuador.

Para la manufactura de estos actuadores, ya que se tiene la forma del actuador, son mezcladas las partículas magnéticas con la matriz de elastómero. Cuando estas ya están mezcladas correctamente, por lo general se induce un campo magnético para que las partículas magnéticas se alineen en la dirección del campo y conserven esta posición hasta que cure la matriz polimérica. De esta manera, cuando el actuador sea expuesto a un campo magnético diferente a la alineación de sus partículas, el actuador experimenta un desplazamiento para que sus partículas estén lo más alineadas posibles con el campo magnético externo.

Uno de los actuadores blandos magnéticos que podemos mencionar para entender mejor el funcionamiento de estos actuadores es el reportado en el artículo “Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions” [41].

En este artículo el autor nos comenta que los robots magnéticos flexibles a pequeña escala utilizan magnetización modelada para lograr una transformación rápida en formas tridimensionales (3D) complejas y, por lo tanto, lograr capacidades y funciones de locomoción. Estas capacidades abordan los desafíos actuales de los microrobots en la administración de medicamentos, la manipulación de objetos y los procedimientos mínimamente invasivos. Sin embargo, los posibles diseños de microrobots están limitados por los métodos existentes para modelar partículas magnéticas y materiales inflexibles. Para resolver esta problemática, el autor reporta un método para modelar micropartículas magnéticas duras en una matriz de elastómero. Este método, basado en litografía ultravioleta (UV), utiliza la reorientación controlada de partículas magnéticas y la exposición selectiva a la luz ultravioleta para codificar partículas magnéticas en materiales planos con orientación 3D arbitraria con un tamaño de característica geométrica tan pequeño como 100 micrómetros. Se pueden fabricar múltiples microrobots planos con varios tamaños, diferentes geometrías y perfiles de magnetización arbitrarios a partir de un solo precursor en un solo proceso. Además, un perfil de magnetización 3D permite la flexión de orden superior y multieje, la flexión de gran ángulo y la flexión y torsión combinadas en una hoja de polímero, lo que crea cambios de forma inalcanzables anteriormente y mecanismos de locomoción micro robóticos, como agarre de potencia de múltiples brazos.

En este artículo, el autor crea dominios magnéticos de forma discreta, es decir, que la magnetización local puede tener cambios repentinos con respecto a áreas adyacentes. La capacidad de programar con precisión la magnetización 3D discreta en materiales flexibles puede habilitar actuadores planos que tienen una distribución arbitraria del par magnético. La distribución del par magnético deseada, expresada en función de la ubicación, se puede asignar directamente al perfil de magnetización de la hoja si el tamaño de cada área de magnetización es lo suficientemente pequeño. Además de patrones precisos, la magnetización 3D discreta puede mejorar el rendimiento de los actuadores magnéticos e introducir nuevos diseños.

Para lograr los diferentes patrones de magnetización en regiones discretas, el autor nos muestra un dispositivo que es capaz de controlar la dirección del campo magnético y fijar las partículas magnéticas en la dirección correcta. La figura 9 ilustra la configuración de este dispositivo.

El material con el que están hechos estos actuadores se crea mezclando partículas magnéticas duras pre magnetizadas con resina UV flexible. Con el sensor de efecto Hall de tres ejes que proporciona datos de retroalimentación (Figura 9), el imán permanente del cubo debajo del material podría generar un campo magnético para orientar con precisión todas las partículas magnéticas incluidas en la resina UV. Después de la reorientación de las partículas, el proyector de procesamiento de luz digital (DLP) emite luz ultravioleta en regiones seleccionadas del sustrato, lo que inicia la polimerización y congela las partículas magnéticas dentro de esas regiones. Este procedimiento automatizado de patrones de dos pasos se puede repetir opcionalmente dependiendo de la complejidad del diseño del actuador.

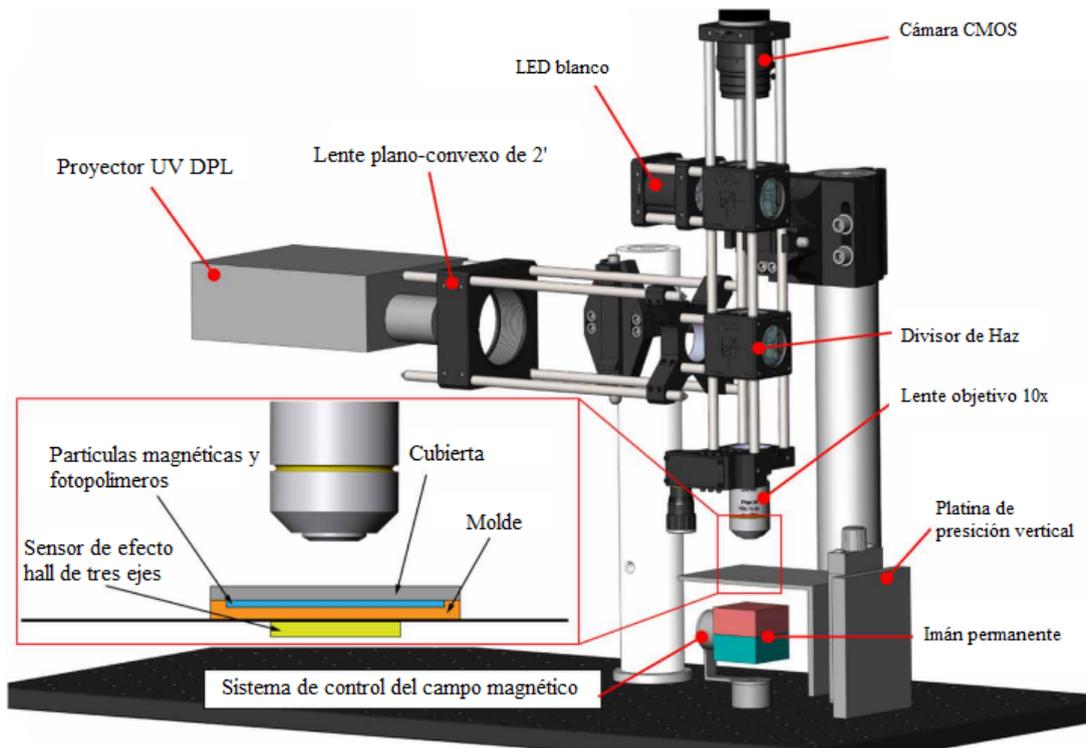


Figura 9. Representación esquemática del sistema para modelar magnetización 3D discreta [41]

Los materiales blandos planares que tienen perfiles de magnetización 3D distribuidos pueden doblarse en formas 3D prediseñadas al aplicar un campo magnético uniforme y volver a la forma original una vez que se elimina el campo. La Figura 10 muestra los estados originales, los estados deformados y los diseños esquemáticos de diferentes tipos de estructuras planas. Algunos de estos dispositivos se diseñaron de manera simétrica o centrosimétrica para que la magnetización neta se alinee con el campo magnético externo durante la activación, lo que resultó en una deformación interna en lugar de una rotación del cuerpo rígido. Como regla general de diseño, la flexión requiere una magnetización variable en el plano del eje neutro, mientras que la torsión requiere una magnetización perpendicular al eje neutro. Las estructuras que contienen componentes de magnetización paralelos y normales al eje neutro producen una combinación de flexión y torsión. Los actuadores fabricados por este método también pueden ser configurados para que actúen como grippers y puedan transportar objetos [41].



Figura 10. Muestra algunas de las respuestas de las diferentes configuraciones de campo magnético. Las flechas amarillas representan la dirección de la magnetización local y las flechas verdes representan la dirección del campo magnético de actuación [41].

1.3.3 Actuadores térmicos

Dentro de los actuadores que presentan una respuesta en función de un cambio de temperatura, podemos encontrar a los geles hechos con Poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPA) y sus derivados. Los geles activados térmicamente producen un cambio de volumen debido a las transiciones de fase térmica, generalmente dentro de un rango de temperatura de 20 °C a 40 °C. Estos polímeros exhiben una fuerza contráctil de 100 kPa con un tiempo de respuesta de 20 a 90 segundos [42].

El poli(vinil metil éter) (PVME) es uno de los polímeros termosensibles más utilizados. Este material sufre transición de fase a 38 °C; por debajo de la temperatura de transición de fase. El PVME es completamente soluble en agua. El polímero se precipita con un aumento de la temperatura, y la red de polímero se transforma de una estructura hidrófila a una hidrófoba. Cuando se empleó un gel, la transición produjo un cambio de volumen. El PVME se puede reticular en un hidrogel mediante radiación de rayos gamma. La radiación de alta energía es uno de los métodos más utilizados para fabricar hidrogeles de polímeros reticulados. Con el aumento de la temperatura, se expulsa agua de la red de gel, provocando su contracción. La transición de fase de volumen, inducida por el cambio de temperatura, se puede aprovechar en el desarrollo de actuadores blandos termosensibles, separación termosensible, etc.

Las características de deformación de un hidrogel termosensible se pueden controlar mediante la incorporación de tensioactivos o grupos iónicos en una red polimérica. Las propiedades de deformación del hidrogel varían según el tipo y la concentración del tensioactivo o de los grupos iónicos. Se están desarrollando hidrogeles termosensibles rápidos y sensibles utilizando geles porosos de PVME, que se hinchan y encogen mucho más rápido que los geles homogéneos [43].

La figura 11 muestra una de las aplicaciones de este tipo de actuadores para el control de flujo en una tubería en función de la temperatura del fluido.

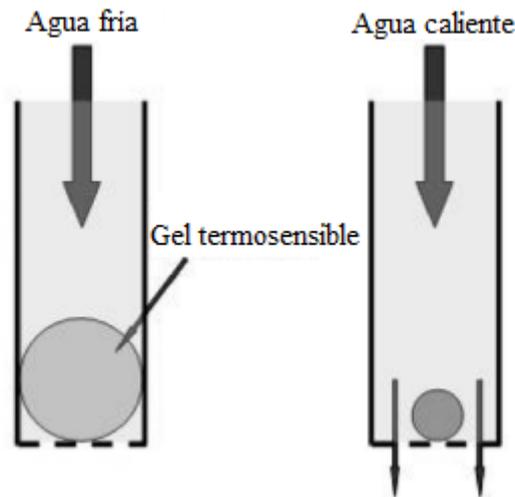


Figura 11. Muestra un actuador de gel termosensible utilizado como válvula para que sólo se permita el flujo de agua caliente por la tubería [43].

1.3.4 Actuadores neumáticos

Los actuadores neumáticos e hidráulicos han sido populares durante mucho tiempo entre los métodos de accionamiento suave gracias a sus fuerzas relativamente grandes, tiempos de respuesta rápidos, altas densidades de trabajo y grandes tensiones. Gran parte de los trabajos de investigación reciente se han centrado en la incorporación de actuadores neumáticos integrados en dispositivos robóticos de locomoción, agarre y hápticos portátiles o de asistencia. Algunas investigaciones se han concentrado en mejorar los métodos de control y el direccionamiento de la deformación al someter estos actuadores a una diferencia de presión.

Una limitación de los actuadores neumáticos e hidráulicos es el requisito de una bomba externa para presurizar y despresurizar el fluido de trabajo. Aunque es posible colocar estos componentes a bordo, este equipo puede limitar el diseño y el rendimiento de los robots. Varios grupos han propuesto métodos innovadores para eludir la necesidad de este equipo, eliminando efectivamente la restricción neumática de estos actuadores. Un grupo ha desarrollado un método para inducir la contracción neumática durante un período más largo (70 s) mediante la evaporación de etanol por calentamiento resistivo, mientras que otros han empleado la combustión para lograr la flexión. La deformación en estas cámaras de aire funcionales también se puede lograr a través de métodos alternativos como el electromagnetismo, lo que permite la locomoción con un hardware mínimo. Estas técnicas eliminan de manera efectiva la atadura neumática, pero presentan nuevos desafíos, como una velocidad de respuesta lenta, una fuerza de salida reducida o un control y tiempo de actuación muy limitados [44].

Dentro de los actuadores neumáticos podemos encontrar dos grandes grupos: Los músculos neumáticos (también conocidos como músculos *McKibben*) y los Actuadores Pneu-Nets.

Los músculos neumáticos, técnicamente hablando, son esencialmente un tubo interior de caucho o elastómero rodeado por una vaina trenzada de doble hélice común. Cuando se genera una presión interna dentro de la cámara, la punta libre del músculo artificial se contrae, mientras que la vaina externa mantiene su forma cilíndrica, generando una expansión en la parte media. Un músculo McKibben se puede construir y poner en uso fácilmente si se dispone de una fuente de presión moderada. La invención de este músculo artificial generalmente se atribuye a Richard H Gaylord (1958), quien describió el actuador como "un medio tubular expansible alargado rodeado por una vaina tejida que forma una cámara expansible que se contrae en longitud cuando se expande circunferencialmente", pero se popularizó en el comienzo de la década de 1960 por Joseph L McKibben, después de que su hija quedara paralizada por la poliomielitis [27]

Dentro de las principales desventajas de este tipo de actuadores, podemos mencionar su incapacidad para producir una gran fuerza a través de una gran excursión. Estas características pueden explicar su principal aplicación en el diseño de órtesis de prensión de dedos motorizadas. Sin embargo, incluso limitado a este campo de aplicación, su uso requiere de fuentes de presión. Respecto al control de los dispositivos que utilizan este tipo de actuadores, generalmente se hace utilizando otro músculo neumático, el cual funciona como antagonista. Este tipo de actuador también es actualmente utilizado en la industria para los procesos de automatización industrial, al igual que los pistones neumáticos [27]. La figura 12 muestra el funcionamiento de este actuador.

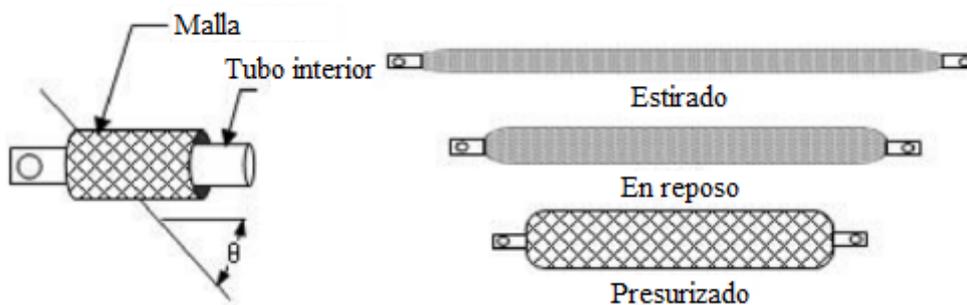


Figura 12. Muestra la estructura y el comportamiento de los músculos neumáticos [27].

Por otro lado, los actuadores neumáticos denominados como "Pneu-nets" (Llamados así por la frase en inglés *pneumatic networks*) son una clase de actuador blando desarrollado originalmente por el Whitesides Research Group en Harvard. Estos están formados por una serie de canales y cámaras dentro de un elastómero. Los canales se inflan cuando se presurizan, creando movimiento.

La naturaleza de este movimiento se controla modificando la geometría de las cámaras empotradas y las propiedades de los materiales de sus paredes. Cuando se presuriza un actuador PneuNets, la expansión se produce en las regiones más flexibles (menos rígidas). Por ejemplo, si PneuNet está compuesto de un solo elastómero homogéneo, la mayor parte de la expansión ocurrirá en las estructuras más delgadas. Los diseñadores pueden pre programar el comportamiento del actuador seleccionando espesores de pared que darán como resultado el tipo de movimiento deseado.

Además, se pueden usar diferentes materiales en combinación para permitir un mayor control sobre el comportamiento del actuador. Si un actuador PneuNets contiene capas de materiales con diferente comportamiento elástico, el material "elástico" se expandirá más que el material "rígido" cuando se presuriza el actuador. En este tipo de configuración, llamamos al material más rígido la "capa limitadora de tensión", ya que restringe la cantidad de tensión que puede ocurrir. El efecto de "deformación diferencial" se puede utilizar para lograr movimientos útiles como doblar y torcer [45].

La figura 13 muestra los tipos de respuesta que pueden tener los actuadores neumáticos dependiendo de su configuración o geometría.

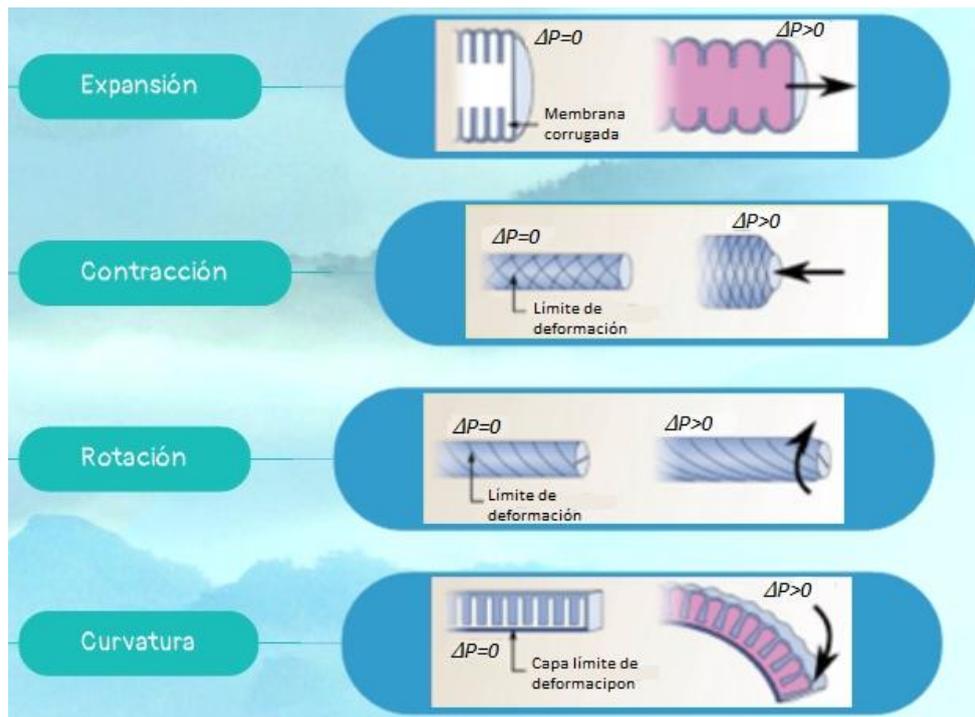


Figura 13. Tipos de respuesta de los actuadores neumáticos.

Los actuadores blandos neumáticos son los actuadores que más aplicaciones han tenido en el área de la ingeniería. Este tipo de actuadores tienen en la actualidad gran cantidad de áreas de aplicación, entre las que se pueden mencionar el área de búsqueda y rescate, la fisiología, industria, y por supuesto, la robótica blanda. Dentro del área de la fisiología, en la actualidad, este tipo de actuadores están siendo utilizados para crear dispositivos que sirvan para la rehabilitación o terapia en pacientes con problemas de movilidad en alguna de sus extremidades, los cuales son más amigables con los usuarios debido a las características principales de estos actuadores. Un ejemplo de estas aplicaciones podría ser el que fue mencionado en el artículo "Design, Modeling, and Testing of a Soft Pneumatic Glove With Segmented PneuNets Bending Actuators" [46]. En este artículo el autor presenta el diseño, modelado y prueba de un guante neumático blando con cinco actuadores de flexión PneuNets segmentados hechos de elastómero, cada actuador impulsa el dedo correspondiente para doblarse. La estructura segmentada del actuador está diseñada de acuerdo con la anatomía de los dedos humanos, es decir, tres segmentos flexibles para las articulaciones de los dedos y cuatro segmentos inflexibles para el metacarpiano y las

falanges de los dedos, lo que hace que el actuador encaje mejor con el dedo que los de estructura homogénea. Para predecir el grado de flexión pasivo y la fuerza de agarre de los dedos impulsados por el dispositivo bajo diferentes presiones, se construye un modelo de abajo hacia arriba a partir del inflado de la pared lateral de la cámara hasta la cinética de acoplamiento de dedos del dispositivo, en la cual se utiliza la teoría de hiperelasticidad de Yeoh y las ecuaciones de Lagrange de robot en serie. El modelo se verifica mediante simulaciones y experimentos FEM simultáneamente. Los resultados mostraron que el modelo y la prueba son básicamente consistentes entre sí y que el diseño del guante blando fue factible.

El funcionamiento de este actuador es muy simple, el guante suave está diseñado para hacer que los dedos se doblen en un cierto ángulo y también para transferir la fuerza adecuada a los dedos, ya que doblar y agarrar son dos ejercicios principales en la rehabilitación de la mano. Esta función la logra el actuador en cada dedo. Los actuadores neumáticos tienen varios segmentos flexibles, (correspondientes a las articulaciones de los dedos) separados por rígidos (correspondientes a las falanges). El dispositivo es inicialmente recto sin presurizar. Cuando se presuriza el actuador, se producen momentos de flexión por la presurización de las cámaras de aire en los segmentos flexibles, que impulsan las articulaciones de los dedos para que giren. Una mayor presión de inflado producirá un mayor momento de flexión y rotación de la articulación hasta que el dedo esté completamente cerrado en un puño. Un objeto colocado en la mano detendrá la flexión adicional del dedo y el actuador. A cambio, el dedo ejercerá una fuerza de contacto sobre el objeto, por lo tanto, para agarrarlo. Cuando se libera el aire, la rigidez intrínseca del actuador puede devolver los dedos a la extensión. Esto es cierto a menos que haya una contractura muscular en los dedos [46]. La figura 14 muestra el funcionamiento de este actuador.

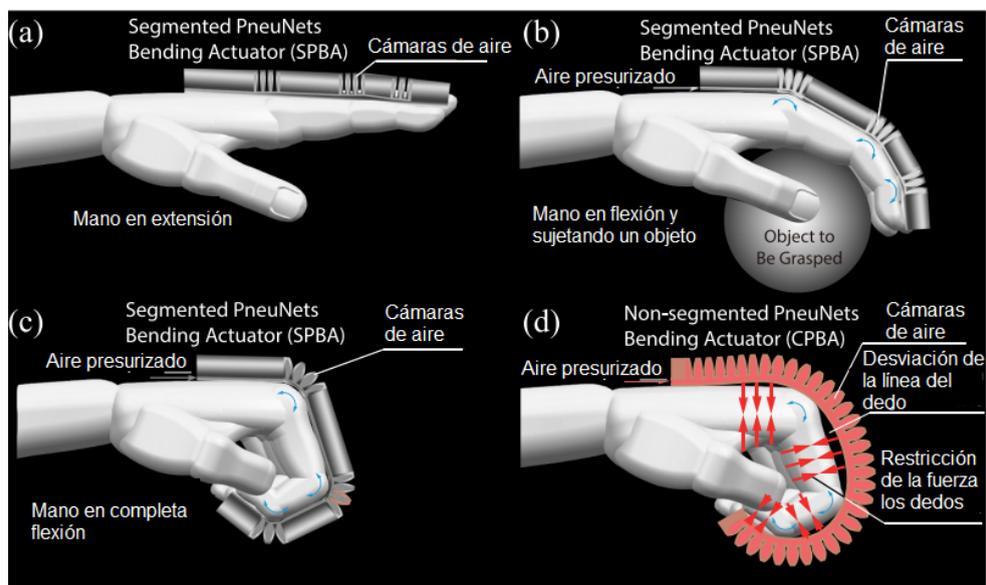


Figura 14: Muestra el funcionamiento del dispositivo de rehabilitación. a) Muestra el dispositivo sin presurizar, b) Muestra el dispositivo presurizado sujetando un objeto, c) Muestra el dispositivo presurizado en una flexión completa, c) Muestra la desventajas de un actuador sin segmentación. [46]

1.3.5 Actuadores fotosensibles

Los actuadores blandos operados por luz generalmente tienen en su composición moléculas de cristal líquido en una matriz polimérica. Los actuadores que están compuestos por cristales líquidos también son conocidos como *Elastómeros de cristal líquido* (LCEs). Los elastómeros de cristal líquido (LCE) se pueden activar al aplicar energía eléctrica mediante calentamiento por efecto joule. En los LCE, la actuación se produce a través de los esfuerzos generados por el cambio de orden y la alineación de las cadenas laterales líquido-cristalinas. Estos cambios de alineación se deben a los cambios de fase inducidos por energía térmica o reacciones fotoquímicas. Por lo general, el flujo inducido en cristales líquidos por campos de tensión evita la acumulación de fuerzas estáticas. En los elastómeros de cristal líquido, las moléculas de cristal líquido están unidas a estructuras poliméricas reticuladas. Esta cadena de polímero flexible permite que las cadenas de polímero se reorienten, pero evita el flujo de moléculas que conducen a la acumulación de fuerzas estáticas que producen tensiones y deformaciones. En cambio, estas tensiones se transfieren, a través de la cadena del polímero, para realizar un trabajo mecánico. Los tiempos de respuesta para los LCE que funcionan por medio de calentamiento suelen ser inferiores a un segundo, pero el proceso de relajación es más lento, en el rango de 10 segundos. Se necesita enfriamiento para expandir el material a sus dimensiones originales [35].

Por otro lado, los actuadores de LCEs que funcionan con reacciones fotoquímicas están hechos con un material adicional llamado *Azobenceno*. Este tipo de LCE aprovecha la propiedad de los cristales líquidos de exhibir un buen movimiento cooperativo, y, por lo tanto, si una pequeña porción de las moléculas de LC cambia su alineación en respuesta a un estímulo externo, la alineación de otras moléculas de LC también cambia (efecto dominó), con una mínima cantidad de energía. Adicionalmente, moléculas como los azobencenos pueden sufrir una reacción fotoquímica reversible entre dos formas, como se muestra en la figura 15. Cuando se incorpora un pequeño número de moléculas fotocromáticas en las moléculas de LC y las mezclas huésped/huésped resultantes se irradian para provocar reacciones fotoquímicas de las moléculas fotocromáticas huésped, se puede inducir isotérmicamente una transición de fase de LC a isotrópica de las mezclas. Esta transición de fase inducida fotoquímicamente se denomina transición de fase fotoquímica y es reversible. La idea es muy simple. La forma trans del azobenceno, con forma de barra, por ejemplo, estabiliza la estructura de fase del LC, mientras que la forma cis doblada tiende a desestabilizar la estructura de fase. [47]

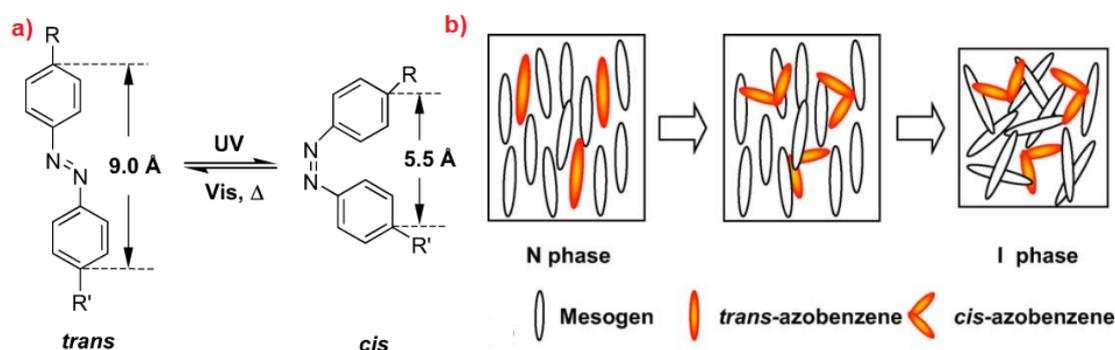


Figura 15. a) Muestra la isomerización de los derivados de azobenceno, b) Muestra el proceso de *trans*-isomerización, de orientación y relajación, donde la fase en "N" es nemática, e "I" Isotrópica. [47]

Uno de los actuadores blandos que utiliza este principio de operación es el reportado en el artículo “Light-Driven Soft Robot Mimics Caterpillar Locomotion in Natural Scale” [48]. En este artículo, el autor reporta un robot oruga blando a escala natural basado en un monolito de elastómero de cristal líquido optomecánico. El cuerpo del robot está hecho de una tira de elastómero sensible a la luz con una alineación molecular modelada que permite impulsar deformaciones móviles mediante iluminación secuencial y no recíproca. Al controlar el patrón de deformación del viaje, el robot exhibe diferentes modos de andar mientras camina sobre superficies horizontales. El robot puede ejecutar varias tareas, como subir una pendiente, pasar a través de una rendija estrecha y empujar objetos, lo que demuestra su capacidad para desempeñarse en diferentes entornos. Para lograr el proceso de marcha, primero se proyecta un rayo láser en la cola (el extremo posterior de la raya) y se deforma en una forma curva al absorber la luz, al mismo tiempo que se levanta del suelo y se acorta. Al escanear el rayo láser hacia la cabeza del robot (el extremo delantero), se crea una deformación móvil, como en las orugas que se arrastran. Después de que el haz de luz completa el escaneo, el robot vuelve al estado plano original, completando así un paso adelante en el ciclo de pasos. La figura 16. muestra la secuencia de avance del actuador.

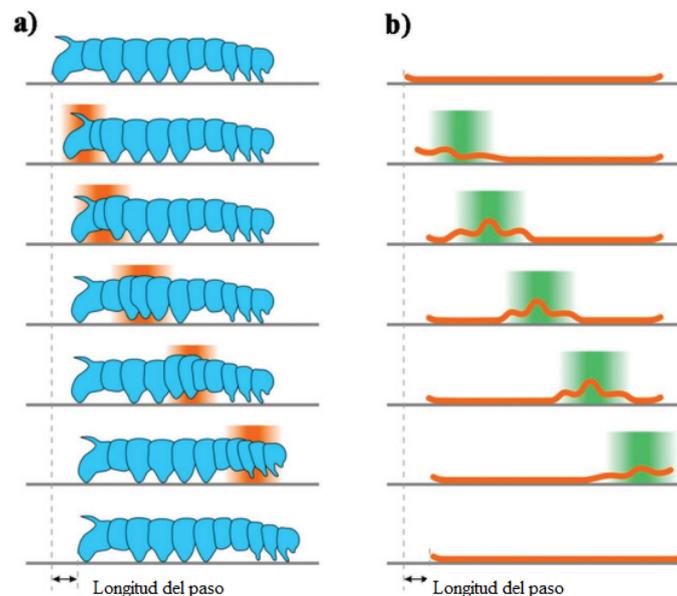


Figura 16. a). Muestra el proceso de marcha de una oruga b) Muestra el actuador blando imitando la marcha de la oruga mediante la contracción local asociada con la flexión en espiral. El sombreado verde indica el área iluminada con un rayo láser que induce la deformación de ondulación del robot [48]

La actuación está asociada con la generación de calor inducida por la luz, en vez de la isomerización trans-cis, ya que la longitud de onda de excitación (532 nm) no coincide ni con la absorción trans-cis de las moléculas azo en el ultravioleta, ni con la longitud de onda para la isomerización bidireccional. (trans-cis y cis-trans al mismo tiempo) en moléculas azo alrededor de 490 nm; la concentración de azo molecular (1% en peso) es demasiado baja para desencadenar una actuación mecánica rápida por efectos fotoquímicos; La fuerte intensidad de excitación del láser (decenas de vatios por cm²) y el blanqueo del tinte sugieren efectos de calor inducidos por la luz en el sistema. [48]

1.4 Sensores blandos

De manera análoga a los actuadores, podemos definir a un sensor como *un dispositivo capaz de detectar el estado de una variable física o de un elemento dentro de su entorno*. Por lo tanto, *un sensor blando es un sensor que está hecho de materiales altamente deformables, los cuales tienen una dureza similar a los tejidos de los organismos vivos*. Para el caso de los sensores blandos, estos tienen que estar hechos con materiales de una dureza similar o menos que los actuadores blandos, ya que estos tienen que proporcionarnos información del estado de los actuadores o del sistema sin afectar su comportamiento, es decir, su presencia tiene que ser prácticamente imperceptible. Por esta razón, la mayoría de los sistemas que utilizan actuadores blandos utilizan los sensores convencionales, sin embargo, con este tipo de sensores en ocasiones no pueden describir de manera precisa el estado del sistema.

De manera similar a los actuadores blandos, los sensores blandos pueden ser clasificados por medio de su principio de operación como resistivos, capacitivos, ópticos, magnéticos e inductivos. La figura 17 muestra de forma gráfica los principios de operación de algunos de los sensores blandos que se han desarrollado hasta la actualidad.

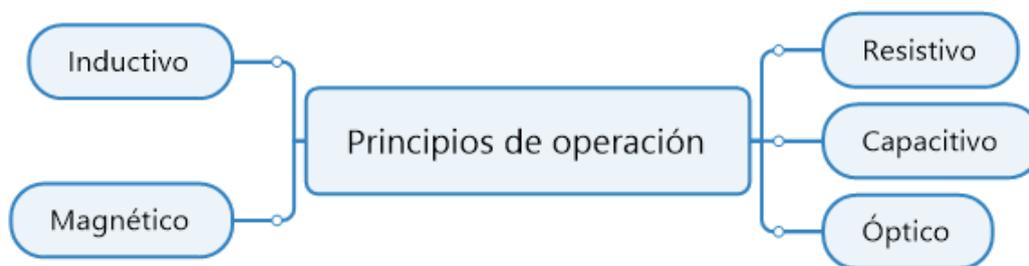


Figura 17. Muestra los principios de operación de los sensores blandos

1.4.1 Sensores resistivos

Los sensores resistivos y piezorresistivos son capaces de detectar el estado de una variable física por medio de la detección en los cambios de resistencia causados por cambios en la geometría o en la resistividad de materiales conductores. En la actualidad estos sensores son capaces de detectar curvatura, fuerza, deformación, elongación, longitud, presión, torsión y dirección. Para realizar esta tarea, los sensores resistivos blandos utilizan las propiedades de los metales líquidos, polímeros conductores e hidrogeles conductores. Cada uno de los materiales utilizados tiene sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, los metales líquidos pueden ser utilizados para medir deformación por su alta conductividad, sin embargo este tipo de sensores tienen la desventaja de que su resistividad cambia con la temperatura, son muy densos, y son más caros en comparación con las demás opciones.

Los sensores que funcionan por medio de este principio de operación podemos dividirlos en dos: Los puramente resistivos y los piezorresistivos. Para entender el principio de operación de los sensores puramente resistivos, tenemos que recordar la definición de resistencia: La resistencia de cualquier material conductor es directamente proporcional a la longitud y la

resistividad del material por el cual circula una corriente eléctrica, y es inversamente proporcional al área transversal del mismo. Entonces, podemos decir que la resistencia del material está en función del tipo de conductor y de la temperatura (ρ), y, obviamente, la longitud (l) y el área transversal (A) de la geometría. En la figura 18 se puede observar los diferentes parámetros que influyen en las señales detectadas por los sensores puramente resistivos.

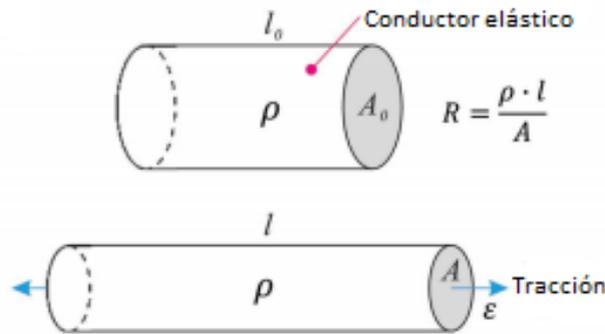


Figura 18. Principio de operación de los sensores resistivos.

Por otro lado, los sensores piezorresistivos son capaces de detectar un cambio en la resistencia por medio de un cambio en la resistividad. A diferencia de los sensores puramente resistivos, en los cuales la resistividad sólo depende del material y la temperatura, la resistividad de estos sensores también depende del esfuerzo al que se está sometiendo. Los cambios de resistividad de los materiales piezorresistivos son causados por la variación de la distancia interatómica en el caso de los metales, y de la variación de los portadores de carga en el caso de los semiconductores al ser deformados por algún tipo de esfuerzo. Estos sensores tienen la desventaja de contar con gran cantidad de histéresis, no linealidad, respuesta lenta y bajos tiempos de recuperación de forma. En la figura 19 se ilustra el principio de operación de los sensores piezorresistivos.

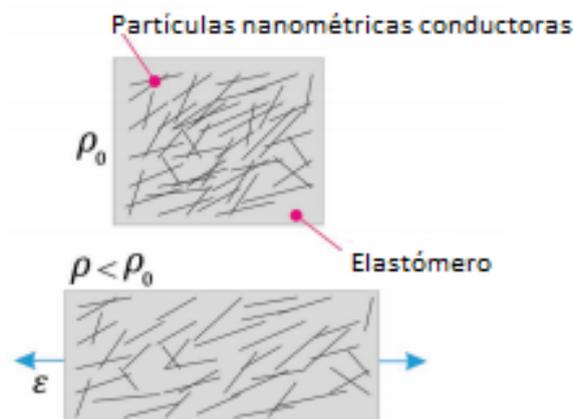


Figura 19. Principio de operación de los sensores piezorresistivos.

Uno de los sensores blandos que utiliza este principio de operación es reportado en el artículo "Design and Fabrication of Soft Artificial Skin Using Embedded Microchannels and

Liquid Conductors” [49]. Este sensor consta de microcanales de varias capas en una matriz de elastómero llena de un líquido conductor (galio-indio eutéctico), el cual es capaz de detectar deformación biaxial y presión. Como se puede observar en la figura 20a, este sensor utiliza el mismo principio de funcionamiento de las galgas extensiométricas (Figura 20b), por lo tanto, los cambios en la resistencia están en función de la geometría.

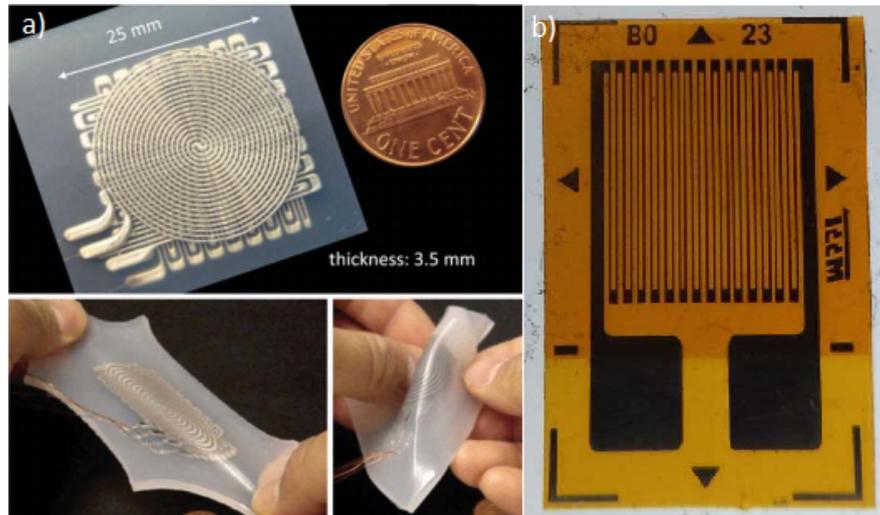


Figura 20. Se muestra a) piel artificial y b) galga extensiométrica [49]

Para detectar la deformación biaxial y la presión, este sensor blando está compuesto de tres capas con canales de fluido conductor. Las dos primeras capas tienen una geometría similar a la de las galgas extensiométricas convencionales, las cuales se colocan una sobre otra con una rotación de 90° para poder detectar la deformación en el plano que contiene al sensor. La tercera capa tiene una geometría en forma de espiral. Esta última es colocada sobre las dos capas anteriores para poder detectar la presión ejercida sobre el sensor. El proceso de manufactura se divide en 3 etapas: Elaboración de las capas (*casting*), unión (*bonding*) e inyección del metal líquido (EGaIn). En la primera etapa (*casting*), se elaboran por separado las capas que contienen las geometrías mencionadas anteriormente. Estas capas se elaboran vertiendo silicón sobre moldes hechos con un proceso de manufactura aditiva. El silicón líquido es curado en un cuarto a temperatura ambiente por tres horas. En la siguiente etapa, las capas de silicona con las diferentes geometrías son superpuestas de tal forma que los caminos de cada capa se unan y puedan formar una sola pista por donde pasará posteriormente el metal líquido (EGaIn). Para que todo quede perfectamente sellado, la pieza completa es sometida a un recubrimiento por centrifugación. Ya que la pieza está completamente curada, se le inyecta el metal líquido por un orificio previamente diseñado. Por último se conectan los electrodos a la pista de metal líquido. Las figuras 21 y 22 muestran el proceso de manufactura.

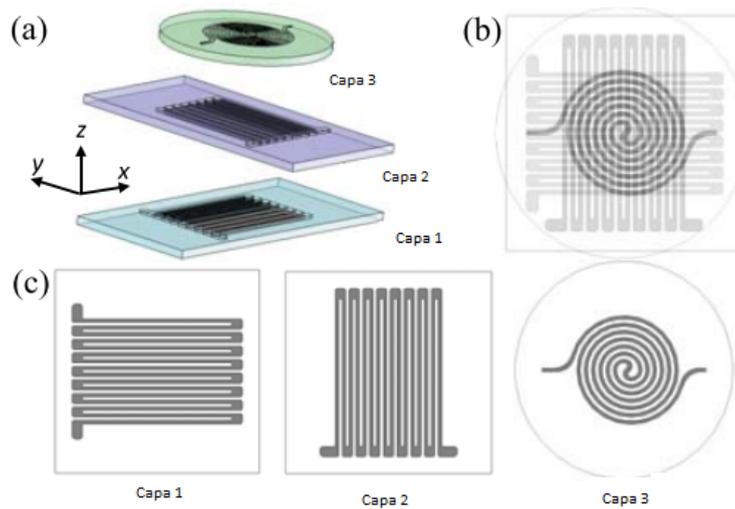


Figura 21. Diseño de las tres capas de sensores con microcanales integrados. (a) Vista de capas. (b) Vista ensamblada. (c) Cada diseño de capa de sensor [49]

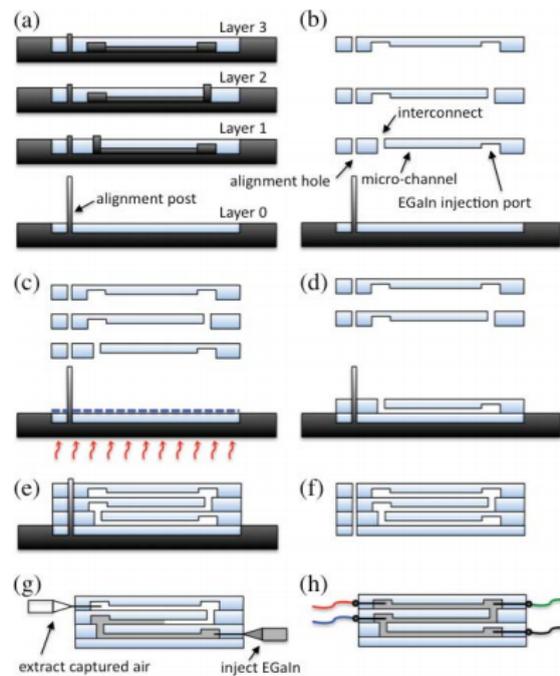


Figura 22. Proceso de fabricación. (a) Prepare moldes y vierta silicona líquida. (b) Retire los moldes cuando la silicona se seque. (c) Cubrir por rotación la capa 0 y curar parcialmente. (d) Unir las capas 1 a 0. (e) Unir las capas 2 y 3 repitiendo el recubrimiento por rotación y el curado parcial. (f) Retire el molde de la Capa 0. (g) Inyecte EGaIn usando jeringas. (h) Conecte el cable insertando electrodos [49].

1.4.2 Sensores capacitivos.

Los sensores capacitivos, como su nombre lo indica, son capaces de detectar variaciones en la capacitancia causados por cambios en la geometría. Estos sensores tienen buenas características, tales como alta linealidad, alta sensibilidad, alto rango dinámico y altas velocidades de respuesta. Sin embargo, sus buenas cualidades también los hacen más sensibles al ruido ambiental. Para resolver los problemas de ruido, estos sensores por lo regular están diseñados con una configuración de tres electrodos y dos capas aislantes. Estos sensores cuentan con electrodos flexibles, los cuales pueden adaptarse a los cambios de geometría del sensor. Los materiales con los que están hechos comúnmente los electrodos son tela conductora, nanocompuestos, polímeros conductores, hidrogeles conductores y líquidos conductores.

Para comprender el principio de operación de estos sensores, primero tenemos que recordar la definición de capacitancia. La capacitancia es la propiedad de los cuerpos de almacenar carga eléctrica, y se define matemáticamente como la relación entre la cantidad de carga almacenada (Q) por unidad de voltaje (V). Un capacitor está compuesto principalmente de dos placas conductoras, las cuales están separadas por un material dieléctrico. La capacitancia puede estar en función de diferentes parámetros que dependen de la geometría del dispositivo, pero la ecuación que define el comportamiento de un capacitor con placas planas está en función únicamente del área de los electrodos y de la distancia de separación de los mismos. La figura 23 ilustra la influencia de la geometría en el valor de la capacitancia.

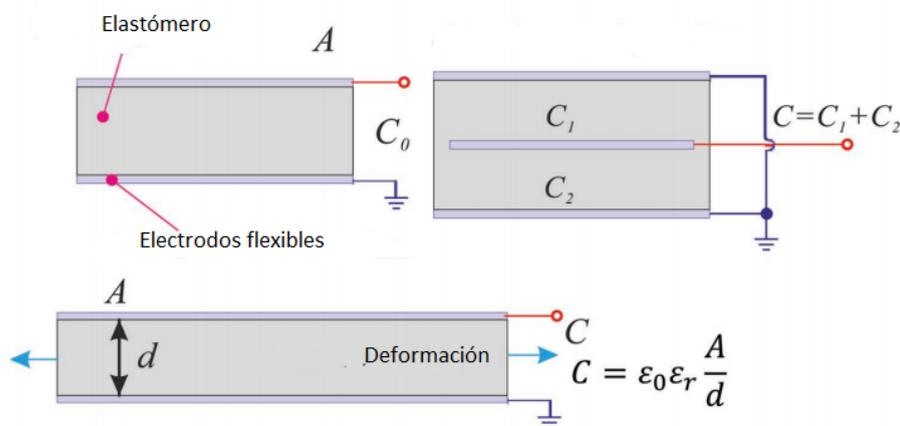


Figura 23. Principio de operación de sensores capacitivos

Dentro de los sensores que utilizan este principio de funcionamiento podríamos mencionar al dispositivo reportado en el artículo “*Highly stretchable electroluminescent skin for optical signaling and tactile sensing*” [50]. En este artículo se presenta un elastómero emisor de luz capacitivo (HLEC), el cual puede ser utilizado como emisor de luz y sensor de deformación y presión. Este dispositivo es una estructura de cinco capas, el cual consiste en una capa de material dieléctrico electroluminiscente que está entre dos electrodos y dos capas de silicona. Los electrodos están compuestos principalmente de materiales como acrilamida, poli(acrilamida), metileno-bis(acrilamida) y cloruro de litio. Estos materiales le dan a los electrodos buenas propiedades mecánicas, además de ser translúcidos. La capa electroluminiscente está compuesta por una mezcla de polvos de fosfato y silicón. Las

capas exteriores que encapsulan a los electrodos están compuestas de silicón. La figura 24 muestra las diferentes capas del dispositivo.

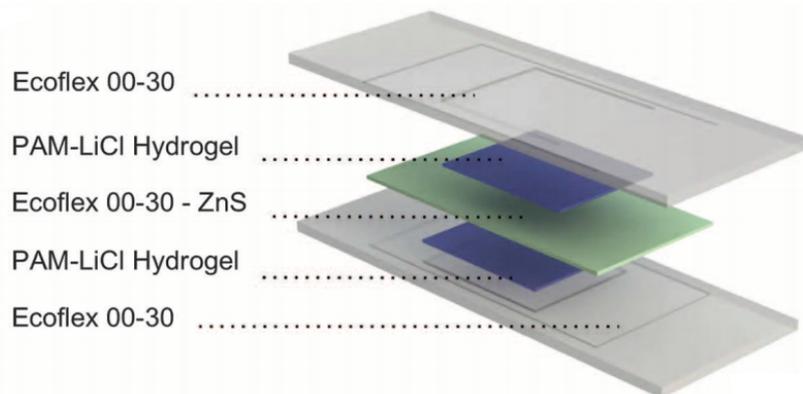


Figura 24. Muestra la vista explosionada del dispositivo HLEC [50]

Para lograr el fenómeno de electroluminiscencia, el dispositivo es sometido a una corriente alterna, la cual provoca un campo eléctrico nominal de 25 kv/cm. Se pueden obtener diferentes tonalidades de luz variando las partículas de cobre y manganeso dopantes de la capa electroluminiscente.

El dispositivo (HLEC) también sirve como sensor de elastómero dieléctrico, debido a su construcción como capacitor de placas paralelas. Esta configuración le permite detectar deformación causada por cambios de presión y extensión. La figura 25 muestra el funcionamiento del sensor.

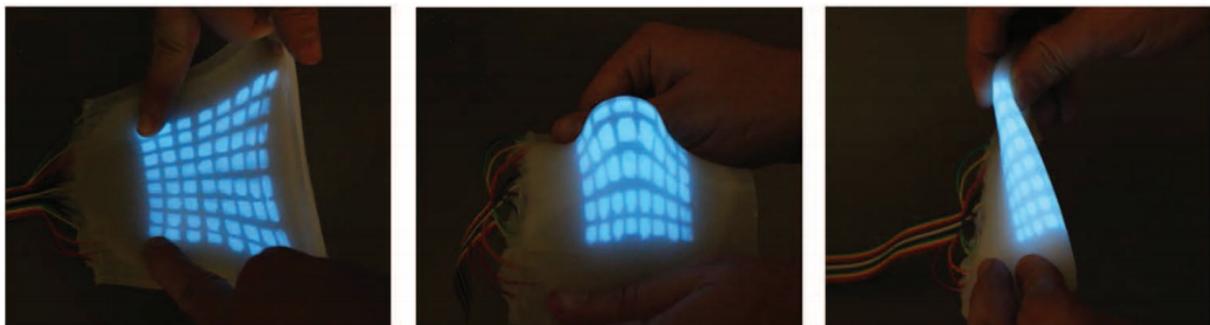


Figura 25. Aplicación del dispositivo [50].

1.4.3 Sensores ópticos

Los sensores ópticos detectan las variaciones en la luz causados por la deformación o presión en el medio de transmisión de la luz. Dentro de las características de estos sensores podemos mencionar que son altamente deformables, no son afectados por la radiación electromagnética ni el ruido ambiental. Este tipo de sensores utilizan principalmente dos principios de operación para su funcionamiento: La reflexión interna total y la absorbancia. La reflexión interna total es un fenómeno que se da cuando la luz que incide en un medio con un alto índice de refracción es reflejada completamente. Por lo tanto, la luz que incide es reflejada en las paredes del material hasta que llega al extremo

opuesto. El fenómeno de reflexión interna total es utilizado en el área de las telecomunicaciones para transmitir información a altas velocidades por medio de *fibra óptica*. Por otro lado, la absorbancia se puede definir como una medida que compara cómo se atenúa la radiación luminosa cuando atraviesa un elemento. Este último fenómeno puede ser aprovechado junto con la ley Beer - Lambert para relacionar la cantidad de luz absorbida por el material y la deformación. La ley de Beer - Lambert establece que la luz absorbida es proporcional a la longitud del medio de transmisión, la absorbancia del material y en número de impurezas presentes en el mismo. La figura 26. ilustra el principio de operación de los sensores ópticos.

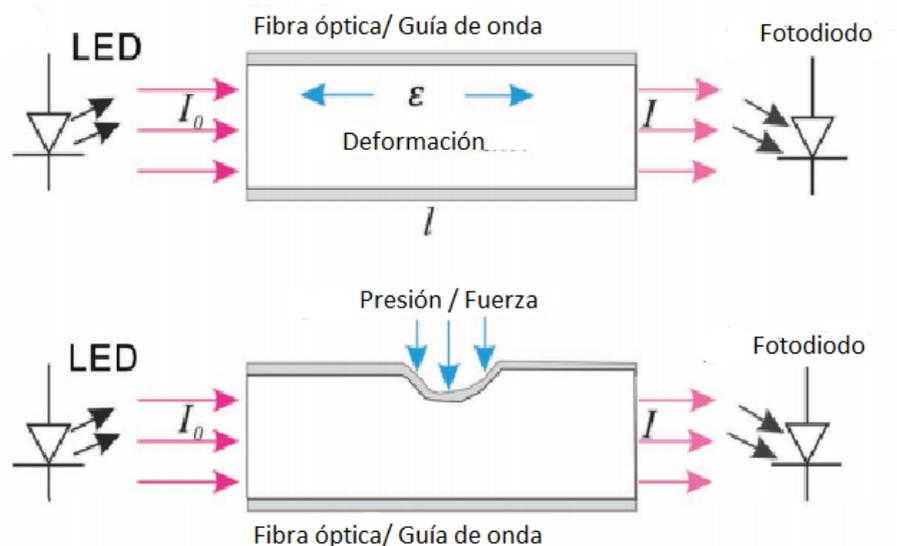


Figura 26. Principio de operación de sensores ópticos.

Uno de los sensores que utilizan este principio de operación es el conocido como “Guía de onda”[51] . La guía de onda es capaz de detectar cambios en la curvatura, presión y elongación de un sistema. Adicionalmente, estos sensores presentan una respuesta lineal si la señal de salida es medida en decibeles. Respecto al principio de funcionamiento, las guías de onda emplean precisamente la reflexión interna total para transmitir la luz emitida por un LED al otro extremo del sensor, donde es recibida por un fotodiodo. Las variaciones que detecta este sensor están en función de la variación en la intensidad de luz recibida en el fotodiodo. En la figura 27 se puede observar la transmisión de luz por medio de una guía de onda.



Figura 27. Guía de onda [51]

Respecto al proceso de manufactura, las guías de onda están hechas principalmente de dos materiales hiperelásticos, generalmente siliconas. El primer material es utilizado como núcleo, el cual se caracteriza por ser translúcido y tener un alto índice de refracción. El segundo material es utilizado como protección para el núcleo y se caracteriza por tener buenas propiedades hiperelásticas y tener un índice de refracción menor que el núcleo. Para comenzar con la elaboración de este sensor, el primer paso es verter el material que va a servir como recubrimiento en un molde previamente diseñado con la geometría del núcleo. Ya que curó el material, el cuerpo es retirado del molde para verter el material que servirá como núcleo. Por último se recubre la parte faltante del núcleo y se conectan el LED y el fotodiodo. La figura 28 muestra el proceso de manufactura.

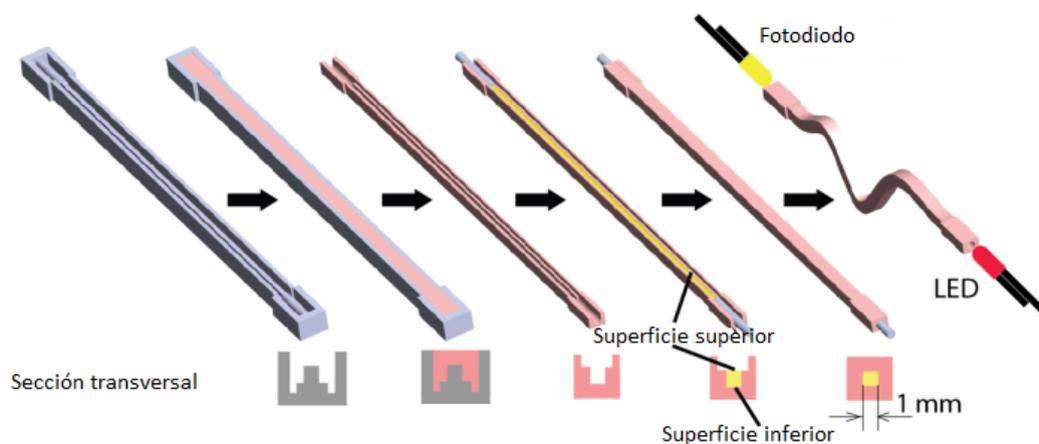


Figura 28. Proceso de manufactura [51]

1.4.4 Sensores magnéticos

Los sensores magnéticos blandos están compuestos por una fuente magnética permanente, un detector de campo magnético y un cuerpo blando. El detector de campo magnético generalmente utiliza el efecto Hall. Cuando el cuerpo del sensor es estirado, comprimido o sometido a torsión, la posición de la fuente magnética permanente cambia respecto al detector de campo, lo que provoca un cambio en la lectura del sensor. Este tipo de sensores pueden realizar la detección sin contacto, no son afectados por condiciones ambientales y operan a altas velocidades, sin embargo pueden ser afectados por campos magnéticos ambientales. Para comprender el principio de operación de este tipo de sensores primero tenemos que explicar el efecto Hall. De forma simplificada, el efecto hall es causado por la fuerza que experimenta un flujo de electrones al ser expuestos a un campo magnético. La magnitud y dirección de la fuerza es definido por la ley de Lorentz, la cual nos dice que el vector fuerza es igual a el producto vectorial entre el vector de campo eléctrico y el vector campo magnético. La figura 29 ilustra el comportamiento de los electrones al ser expuestos a un campo magnético.

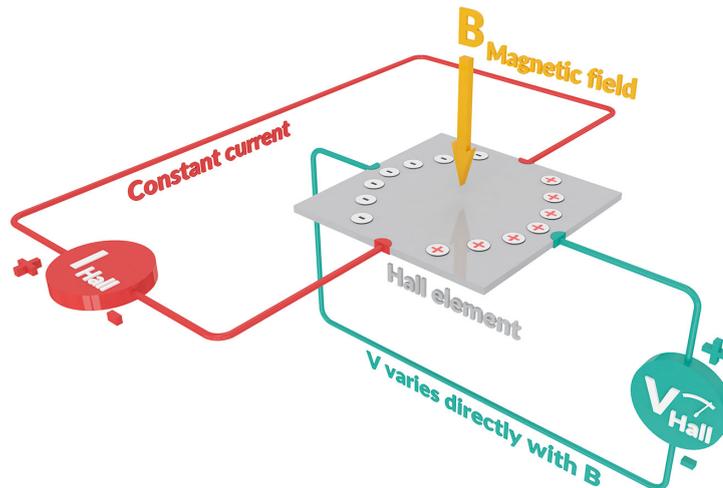


Figura 29. Muestra un flujo de electrones constante (I_{Hall}), el cual está siendo expuesto a un campo magnético constante (B), el cual provoca una diferencia de potencial en dirección perpendicular al flujo de electrones y la dirección del campo (V_{Hall}).

Uno de los sensores blandos que utilizan este principio de operación podemos mencionar al reportado en el artículo “Covering a Robot Fingertip with uSkin: a Soft Electronic Skin with Distributed 3-axis Force Sensitive Elements for Robot Hands” [52]. En este artículo nos presenta un sensor diseñado para ser utilizado como un recubrimiento en forma de piel, la cual tiene el tamaño para ser integrado en regiones en las que se desea alta sensibilidad (como las puntas de los dedos). Este sensor blando cuenta con un arreglo de 24 sensores de efecto hall posicionados en un espacio reducido de 30x35x28 mm. Dentro de las principales características de este sensor podemos mencionar que es capaz de detectar fuerzas ejercidas en las tres direcciones coordenadas y cambios de temperatura. Las propiedades antes mencionadas le dan al sensor la capacidad de distinguir los puntos de contacto, identificar el vector fuerza en tres dimensiones para cada punto de contacto, percibir la forma general de la superficie y la distribución general de los vectores de fuerza. La figura 30 muestra la geometría del sensor y su aplicación.

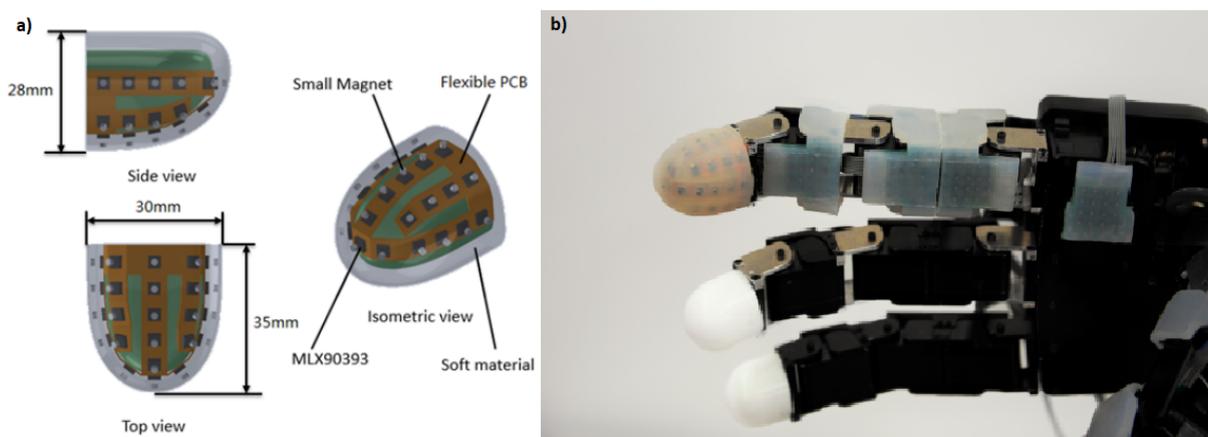


Figura 30. Se muestra a) geometría del sensor y b) su aplicación potencial [52].

El proceso de manufactura de este sensor puede dividirse en dos módulos: el correspondiente a la electrónica y el correspondiente a la manufactura de la piel de silicona.

Para hacer la conexión del arreglo de sensores, se utiliza una PCB flexible previamente diseñada en la cual se pueden apoyar los sensores de manera preliminar. Ya que fueron posicionados y conectados todos los componentes electrónicos, la PCD es doblada de tal forma que tenga la geometría deseada. Para la manufactura de la piel de silicona, se vierte silicona líquida en un molde previamente manufacturado con la posición de los imanes permanentes. Ya que curó la silicona, son colocados en la superficie de la silicona los imanes permanentes. Para este caso se utilizaron imanes de neodimio. Cuando ya están posicionados todos los sensores, estos son recubiertos con otra capa de silicona. Por último son montadas la parte electrónica con piel de silicona. La figura 31 muestra el arreglo de sensores y la figura 32 muestra el proceso de manufactura de la piel de silicona.

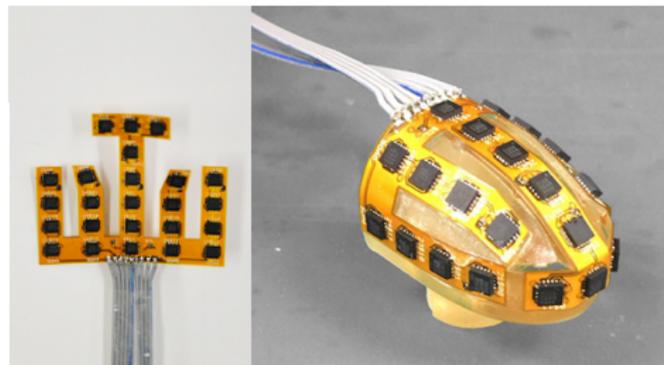
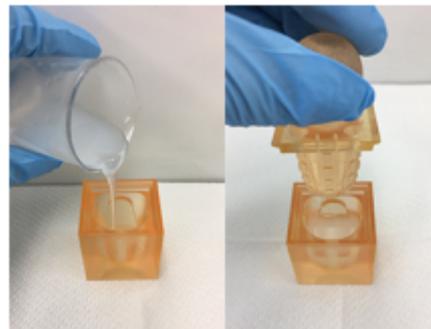
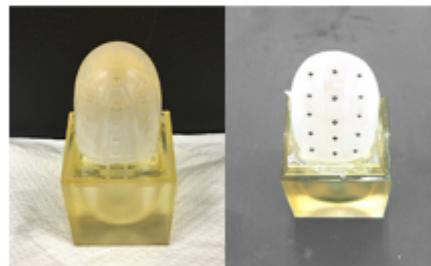


Figura 31. Arreglo de sensores [52]



(a)



(b)



(c)

Figura 32. (a) Se vierte silicona líquida y se coloca el perforador. (b) Se colocan 24 pequeños imanes dentro de los orificios. (c) Los imanes se cubren con otra capa de silicona [52].

1.4.5 Sensores inductivos.

Los sensores inductivos detectan las variaciones de inductancia causados por variaciones en la geometría, inductancia mutua, efecto de corrientes parásitas y reluctancia magnética. Dentro de las ventajas de este tipo de sensores podemos mencionar que no se requiere contacto para la adquisición de la señal, presentan gran exactitud, pueden ser operados a altas velocidades y no son afectados por contaminantes ambientales. Las desventajas que puede presentar este tipo de sensores se encuentra que sólo puede detectar objetos metálicos y la señal detectada puede ser alterada por campos magnéticos ambientales. El principio de operación de estos sensores está basado en el fenómeno de la inductancia. Podemos definir a la inductancia como una oposición a un cambio de corriente en un inductor. Un inductor es un dispositivo que está hecho con un enrollamiento de material conductor, el cual tiene la capacidad de almacenar energía en forma de campo magnético. La ecuación que define la autoinductancia de un inductor está definida por la siguiente ecuación:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

Donde L es la inductancia, μ es la permeabilidad absoluta del núcleo, N es el número de espiras del inductor, A es el área transversal, y l es la longitud del inductor. Conociendo esta ecuación podemos observar la relación que existe entre la inductancia y la geometría del inductor. Por lo tanto, los sensores inductivos blandos son generalmente enrollamientos de material conductor, los cuales tienen como núcleo un cuerpo blando. La figura 33. ilustra el principio de operación de los sensores inductivos blandos.

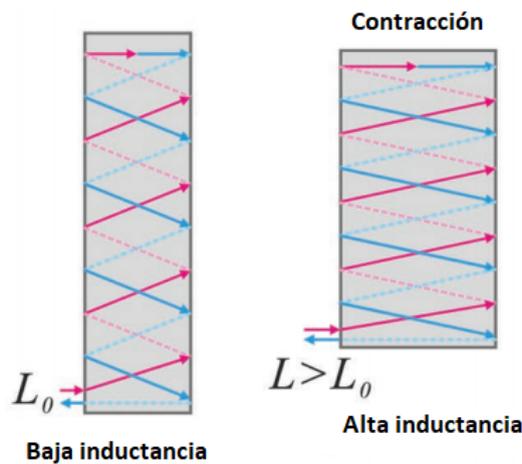


Figura 33. Principio de operación de los sensores inductivos.

Uno de los sensores inductivos blandos que podemos mencionar es el reportado en el artículo "Smart Braid: Air Muscles that Measure Force and Displacement" [53]. En este artículo nos presentan una malla inteligente, la cual está construida con un arreglo de cables configurados de forma helicoidal. Estos cables están conectados en los extremos para formar un solo circuito. Este sensor está diseñado para ser implementado en músculos neumáticos, recordando que los músculos neumáticos están compuestos principalmente de un tubo hecho de algún elastómero y una malla que restringe la expansión transversal. Estos actuadores neumáticos presentan una respuesta de contracción al ser presurizados porque la malla que recubre al tubo de elastómero mantiene su superficie constante. Por lo tanto, la expansión transversal del actuador provoca dicha contracción longitudinal, justo como se muestra en la figura 33. Sabiendo esto, podemos relacionar los cambios de longitud y área transversal del actuador con los cambios en la inductancia de la malla. Además de los cambios de inductancia que experimenta el actuador, también existen cambios en los valores de resistencia debido a la tensión que se ejerce en los cables.

1.4.6 Sensores blandos aplicados a la robótica blanda.

Uno de los robots blandos que utiliza de manera muy ingeniosa las propiedades de los sensores ópticos blandos es reportado en el artículo "Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides" [51]. En este artículo se presenta un robot híbrido, ya que está compuesto de un brazo rígido que tiene como actuador final una mano protésica blanda. Este último actuador tiene la capacidad de manipular objetos, percibir formas por medio de contacto, percibir dureza y rugosidad. La mano protésica está compuesta de cinco dedos artificiales y una base rígida donde son conectados los dedos. Cada dedo a su vez está compuesto por un actuador neumático que presenta una respuesta de curvatura y tres guías de onda. Las guías de onda son integradas en el actuador neumático para poder sensor la presión, curvatura y vibración que está experimentando. La figura 34 muestra los componentes principales del robot blando.

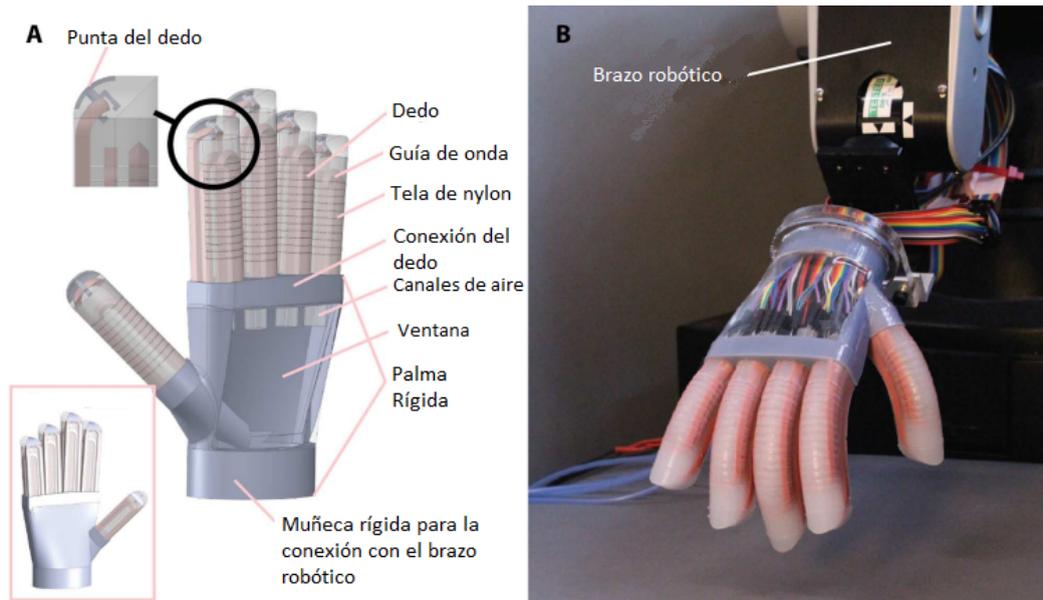


Figura 34. Muestra . (A) Esquema de la estructura y los componentes de la mano; (B) imagen de la mano montada en un brazo robótico [51]

Como se puede ver en la figura 35 (a), las guías de onda están dentro de los dedos en forma de “U”. Como se mencionó anteriormente, cada guía de onda mide diferentes parámetros. La guía de onda más cercana a la palma de la mano está conectada a una pequeña placa metálica que se encuentra fuera del cuerpo blando. Esta placa sirve para que las vibraciones generadas por el contacto con superficies rugosas sean transmitidas directamente al sensor. La guía de onda que se encuentra en medio del dedo sirve para medir la presión dentro del actuador ya que se encuentra más cercana al eje neutro. Por último, la guía de onda que se encuentra en la parte posterior de la mano es utilizada para medir la curvatura del actuador ya que esta es la que sufre más de formación cuando el actuador es accionado. La figura 35 muestra un esquema de los componentes que integra cada dedo y la figura 36 muestra las diferentes funciones que puede realizar el dispositivo.

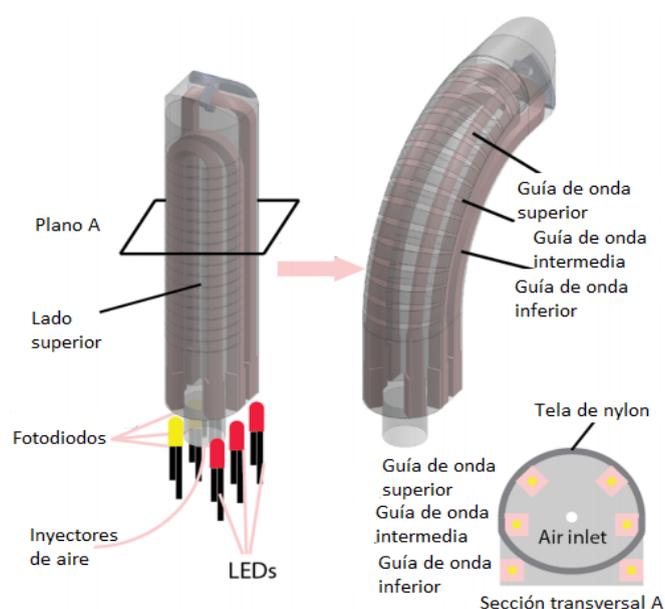


Figura 35. Esquema de un dedo inervado blando [51]

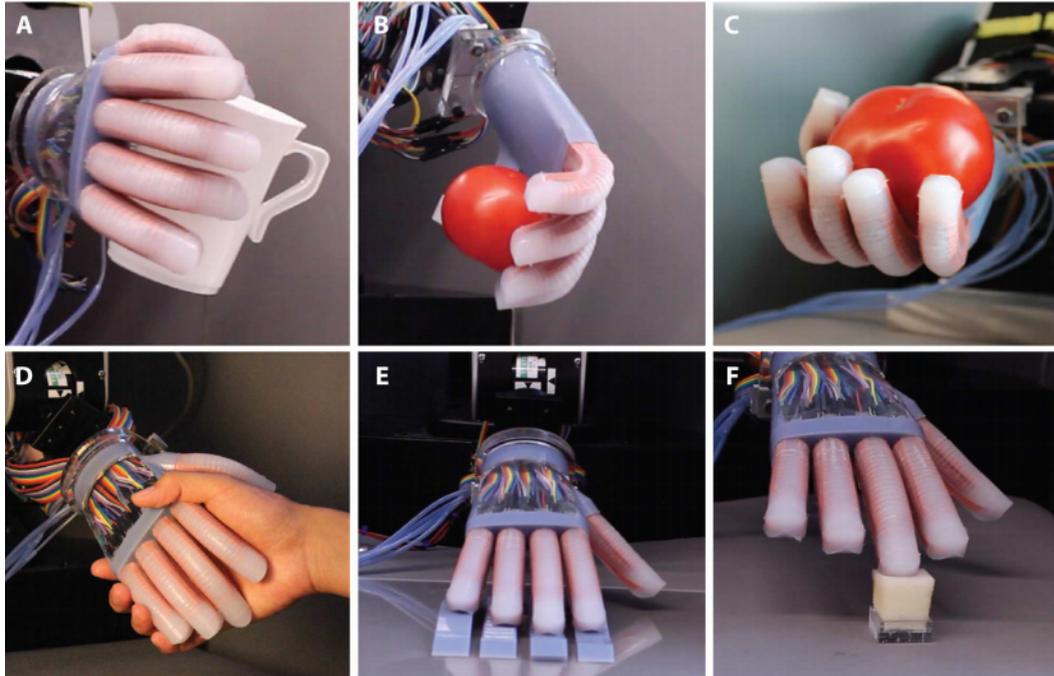


Figura 36. (A),(B), y (C) muestran la habilidad para manipular objetos; (D) estrechar una mano humana; (E) escaneo lateral sobre superficies para detectar asperezas y formas; y (F) probar la suavidad de una esponja suave con el dedo medio [51].

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, los sistemas elaborados con actuadores blandos están siendo supervisados por medio de sensores convencionales. Los sensores convencionales más utilizados para el control de actuadores blandos son los sensores de presión y flujo, en el caso de los actuadores neumáticos. Para el resto de actuadores que no son operados por medio de presión, se utilizan métodos de procesamiento gráfico para supervisar el comportamiento de los sistemas blandos utilizando una cámara de vídeo como sensor. Sin embargo, los sensores convencionales, debido a sus características, en ocasiones no pueden detectar con exactitud el comportamiento que está teniendo el sistema, y si son colocados directamente en los actuadores, estos pueden influir en su comportamiento. Por ejemplo, al tener un modelo que relaciona la presión de un robot neumático con su desplazamiento, si el actuador blando neumático se encuentra con un obstáculo que le impida su desplazamiento, el sensor no detectará este obstáculo si el actuador logra expandirse y soportar la presión. Se podría pensar que para resolver esta problemática tendríamos que colocar un sensor de flujo en la fuente que suministra aire a presión al actuador, para que al relacionar estas dos variables podamos detectar un posible obstáculo, sin embargo, aún así no se sabría la posición exacta del actuador. Para resolver este inconveniente, la mejor opción es utilizar un sensor de posición que se adapte al comportamiento hiperelástico del actuador sin alterar su comportamiento, como podría ser un sensor de posición blando.

Desde hace algunos años se han empezado a desarrollar sensores blandos, los cuales utilizan distintos principios de funcionamiento para poder detectar de manera exacta el estado de los diferentes sistemas a los que se encuentran asociados. Como comentamos anteriormente, el área de los sensores blandos no ha sido tan investigada como los actuadores blandos, a pesar de que los sensores son una parte fundamental para el desarrollo y control de estos sistemas. Dentro de los sensores blandos que se han desarrollado actualmente podemos encontrar a los sensores blandos resistivos, capacitivos, inductivos, etc., pero son de particular interés los sensores que tienen un principio de operación basado en luz, ya que, debido a su mismo principio de operación, estos no son afectados por campos eléctricos o magnéticos, además de que dependiendo de la configuración pueden llegar a ser muy sensibles y eficientes.

Conociendo las principales problemáticas e identificando las características y áreas de oportunidad en los diferentes sensores blandos, se decidió desarrollar un sensor blando basado en guía de onda para verificar y caracterizar su comportamiento.

Objetivo

Desarrollar y caracterizar un sensor blando basado en guía de onda para describir su comportamiento y valorar su viabilidad en el desarrollo de dispositivos blandos o robótica blanda.

Alcances

- Elaborar un sensor blando basado en guía de onda
- Diseñar un circuito que nos permita acondicionar y digitalizar la señal entregada por los sensores auxiliares.
- Diseñar una aplicación donde se puedan visualizar, procesar y exportar los datos recibidos por el sensor blando
- Caracterizar el sensor blando basado en guía de onda.
- Evaluar los resultados obtenidos

2.1 Marco teórico

A continuación se presentan los conceptos y principios que fundamentan el funcionamiento del sensor “Guía de onda”. El desarrollo de este tema se llevará a cabo desde los principios físicos más generales, hasta el fundamento de los sensores y actuadores auxiliares que se utilizaron para el desarrollo de este sensor.

2.1.1 Principio de Huygens

El principio de Huygens se planteó como una posible respuesta a las preguntas ¿Qué pasaría si un haz de luz atraviesa una lámina de vidrio no uniforme?, ¿Cómo podríamos determinar la nueva forma de la onda? ¿Cómo se vería el haz de luz si se le permite a partir de ese momento continuar sin obstáculos?. Para dar una posible solución aceptable a estas preguntas, en el año de 1690 se publicó en un trabajo titulado “Traité de la lumiere” la solución que había propuesto doce años antes el físico holandés Christiaan Huygens. El principio de Huygens establece lo siguiente:

“Cada punto en un frente de onda en propagación sirve como fuente de trenes de ondas esféricas secundarias, de tal modo que, al cabo de cierto tiempo, el frente de onda será la envolvente de estos trenes de onda. Por otro lado, si la onda que se propaga tiene una frecuencia ν , y se transmite por el medio a una velocidad v_1 , entonces los trenes de onda tendrán la misma frecuencia y velocidad” [54]

Debido a que esta teoría fue hecha antes de que se descubrieran las ecuaciones que rigen el comportamiento de las ondas electromagnéticas, este tiene algunos errores. Sin embargo, la idea de que los trenes de onda se propagan a una velocidad determinada por el medio constituye un simple acierto afortunado. A pesar de sus limitaciones, el principio de Huygens resulta útil para llegar hasta la ley de Snell.

En el siglo XIX, Fresnel introdujo acertadamente una serie de modificaciones matemáticas al principio de Huygens, y añadió el concepto de “interferencia”. Un poco más tarde, Kirchhoff demostró que el principio de Huygens-Fresnel era consecuencia directa de la ecuación diferencial de la onda. La figura 37 muestra de forma gráfica el principio de Huygens.

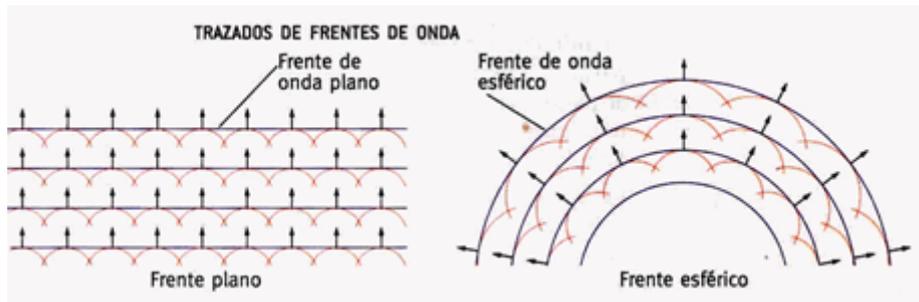


Figura 37. Según el principio de Huygens, una onda se propaga como si el frente de onda estuviera formado por una serie de fuentes puntuales, cada una emitiendo una onda esférica.

2.1.2 Principio de Fermat

Uno de los primeros personajes que estudió el comportamiento de la luz cuando esta era reflejada, fue Herón de Alejandría, que vivió entre los años de 150 a.C y 250 d.C. Fue el primero en establecer lo que hasta entonces se conocía como principio variacional. En su formulación de la ley de la reflexión, Herón afirmó que *la trayectoria tomada por la luz para ir de un punto "S" a un punto "P" a través de una superficie reflectora, era la más corta*. Durante más de 1500 años la curiosa observación de Herón permaneció olvidada, hasta que, en el año de 1657, Fermat propuso su célebre "*principio del tiempo mínimo*", el cual incluía tanto a la reflexión como a la refracción. Este principio establece que un haz de luz que atraviesa una superficie no sigue una línea recta, o trayectoria espacial mínima entre un punto del medio de incidencia y otro del medio de transmisión. Como consecuencia, Fermat reformuló la afirmación de herón de la siguiente manera: *La trayectoria que adopta un haz de luz entre dos puntos es aquella recorrida en el tiempo mínimo*. Al igual que el principio de Huygens, el principio que estableció Fermat era un poco incompleta, ya que la definición más completa está basada en en concepto de *longitud de camino óptica*, sin embargo, con esta observación podemos deducir perfectamente las leyes de la reflexión y la refracción de manera geométrica [54]. La figura 38 muestra de manera gráfica el principio de Fermat.

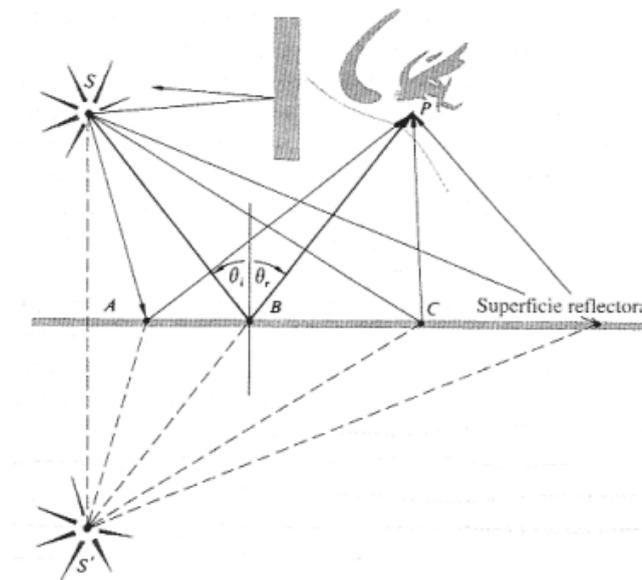


Figura 38. Cómo se puede ver en la figura, sólo una de las trayectorias de los rayos emitidos desde el punto S y reflejados en la superficie reflectora es físicamente posible, la cual corresponde a la trayectoria SBP [54].

2.1.3 Transmisión y el índice de refracción

La transmisión de la luz a través de un medio homogéneo es un proceso continuo y repetitivo de dispersión y redispersión. Cada vez que tiene lugar, se produce un desplazamiento de fase en el campo de luz que, en última instancia, aparece como un cambio de velocidad de fase aparente del haz de luz transmitido con respecto a su valor nominal C (aprox 300,000 Km/s) [54] . Entonces, a pesar de que los fotones sólo exista a una sola velocidad, debido a la interacción entre la perturbación ondulatoria de la onda primaria y de las secundarias sobre los átomos, cuando la luz pasa a través de un material, se puede observar una aparente disminución en su velocidad de propagación. De este modo, se definió un número adimensional llamado índice de refracción, el cual compara la velocidad de la luz en el vacío respecto a la velocidad de la luz a través de un material. Evidentemente, la velocidad de la luz a través del material depende de la permeabilidad eléctrica y magnética del mismo. Entonces, para comparar la velocidad de la luz al viajar a través de un material respecto a la velocidad de la luz en el vacío, se definió un concepto denominado el “*índice de refracción*”, el cual se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$N = \frac{C}{V}$$

Donde “ N ” simboliza el índice de refracción, “ C ” el valor de la velocidad de la luz en el vacío y “ V ” la velocidad de la luz a través del material. Entonces, como la velocidad de la luz en el material siempre es menor que en el vacío, el índice de refracción siempre será mayor que uno.

2.1.4 Reflexión

Cuando un haz de luz incide en un medio transparente, como una lámina de vidrio, podemos observar a simple vista, por mínimo que sea, que el haz de luz se divide en dos direcciones, uno a través de la lámina y otro que permanece en el medio de origen. Dependiendo del material, la intensidad y dirección de cada uno de estos haces cambia en función de sus propiedades. En la figura 39 se muestra como se divide la luz proveniente de un rayo láser al cambiar el medio de propagación.

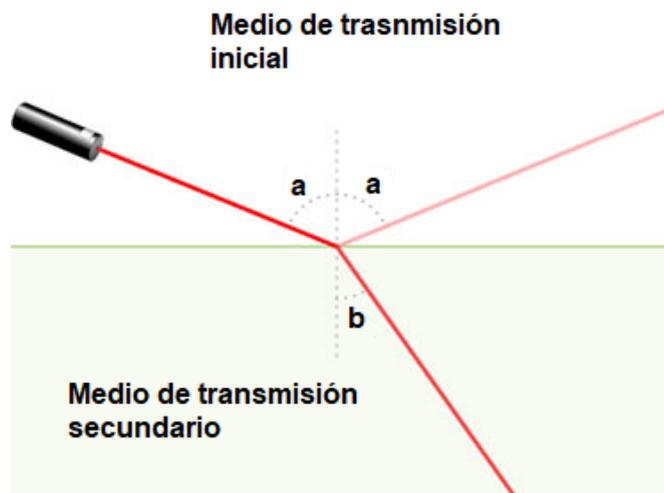


Figura 39. Muestra la división de un haz de luz al cambiar de medio

Basándonos en la figura 39, al cambio de dirección hacia el medio de origen de una fracción del rayo incidente al llegar a la interfase entre los medios se le conoce como *reflexión*. El fenómeno de reflexión de la luz siempre cumple las siguientes reglas [55]:

1. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie reflectora están en un plano común. Esta ley es una consecuencia obvia del principio de Fermat.
2. La magnitud del ángulo de reflexión es igual a la magnitud del ángulo de incidencia

2.1.5 Refracción

El fenómeno de refracción, basándonos en la figura 39, se puede observar como una fracción del haz de luz que pasa a través de material. El rayo que pasa a través del medio secundario, si este medio tiene un índice de refracción mayor a uno, siempre va a estar desviado de la trayectoria del haz de luz inicial. Por lo tanto, al hecho de que los haces de luz se doblen o desvíen de su camino al cambiar el medio de transmisión se le denomina *refracción*.

Este fenómeno, a diferencia del fenómeno de reflexión, que podría ser entendido como una analogía a la conservación de la cantidad de movimiento, no es tan intuitivo comprenderlo, pero aplicando los principios mencionados anteriormente, este fenómeno también puede ser comprendido y demostrado claramente. Al igual que en el fenómeno de reflexión, el principio de Fermat también puede ser aplicado al fenómeno de refracción, y haciendo algunas consideraciones geométricas, podemos llegar a la expresión matemática que rige el comportamiento de este fenómeno.

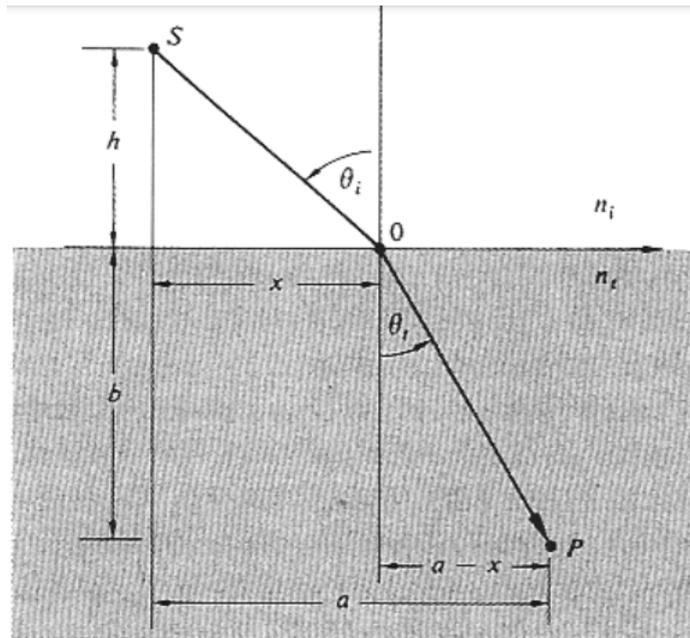


Figura 40. Muestra la trayectoria que seguiría un haz de luz para llegar de un punto S a un punto P, los cuales se encuentran en diferentes medios. También se muestran los parámetros a considerar para deducir la ecuación que rige el comportamiento del fenómeno de refracción.

Para deducir la ecuación que rige el comportamiento de la ley de la refracción, nos basaremos en la figura 40 para hacer las consideraciones geométricas necesarias. La figura 40 nos muestra la trayectoria que seguiría un haz de luz para llegar de un punto S a un punto P, los cuales se encuentran en diferentes medios. Entonces, para poder saber el tiempo que tardará el haz de luz en llegar del punto S al P, tenemos que sumar el tiempo que tardó en recorrer las distancias en los diferentes medios. Para este caso, dividiremos las distancias entre los puntos de referencia y la interfase, sobre sus respectivas velocidades, obteniendo la siguiente expresión matemática:

$$t = \frac{|SO|}{v_i} + \frac{|OP|}{v_t}$$

O bien:

$$t = \frac{\sqrt{h^2 + x^2}}{v_i} + \frac{\sqrt{b^2 + (a-x)^2}}{v_t}$$

Ya que tenemos la expresión para saber cuánto tiempo tardará el haz de luz para llegar del punto S al P, aplicando el principio de Fermat, podemos saber cuál es la trayectoria que seguirá este haz de luz. Entonces, como el tiempo tiene que ser mínimo, derivamos la expresión que define al tiempo y la igualamos a cero para obtener la siguiente expresión matemática:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{\sqrt{h^2+x^2}}{v_i} + \frac{\sqrt{b^2+(a-x)^2}}{v_t} \right) = 0$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v_i \sqrt{h^2+x^2}} + \frac{-(a-x)}{v_t \sqrt{b^2+(a-x)^2}} = 0$$

Si prestamos atención a la expresión resultante, nos podemos dar cuenta de lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{sen}(\theta_i) &= \frac{x}{\sqrt{h^2+x^2}} \\ \text{sen}(\theta_t) &= \frac{(a-x)}{\sqrt{b^2+(a-x)^2}} \end{aligned}$$

Sustituyendo estas expresiones e igualando los términos obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{\text{sen}(\theta_i)}{v_i} = \frac{\text{sen}(\theta_t)}{v_t}$$

Y si multiplicamos ambos miembros por el valor de la velocidad de la luz, obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{\text{sen}(\theta_i)}{n_i} = \frac{\text{sen}(\theta_t)}{n_t}$$

Donde:

n_i = Índice de refracción primario

θ_i = Ángulo de incidencia

θ_t = Ángulo de transmisión

n_t = Índice de refracción del medio secundario

Esta última expresión matemática es la que define el comportamiento o dirección de un haz de luz al interactuar con medios con diferentes índices de refracción. Esta expresión es llamada ley de Snell - Descartes, en honor a Willebrord Snell y René Descartes, quienes fueron los primeros en descubrir este comportamiento.

Reflexión interna total

La reflexión interna total es un fenómeno que se da cuando un haz de luz, el cual está viajando de un medio con **mayor** índice de refracción a uno de **menor** índice de refracción, es reflejado totalmente a su medio original sin poder escapar. Para explicar este fenómeno, tenemos que recordar que la intensidad de los haces reflejados y transmitidos cuando este entra en contacto con un material dependen de sus propiedades físicas y la forma en la que incide el haz. Sabiendo esto, la reflexión interna total se da cuando en la ecuación de snell se obtiene, para el haz transmitido, un ángulo mayor o igual a 90° . Cuando el valor del ángulo del haz transmitido es igual a 90° , este recibe el nombre de *Ángulo crítico*. Aplicando las condiciones antes mencionadas a la ley de snell obtenemos la siguiente expresión:

$$\text{sen}(\theta_i) = \frac{n_i}{n_t}$$

$$\theta_i = \text{Arcsen}\left(\frac{n_i}{n_t}\right); n_i > n_t$$

Como podemos ver en la ecuación anterior, el fenómeno de reflexión interna total está en función del ángulo de incidencia, el cual a su vez está en función de los índices de refracción de los materiales. Este fenómeno es muy utilizado en la transferencia de información a través de fibras ópticas

2.1.6 Fibras ópticas

Una fibra óptica es un dispositivo capaz de transmitir información de forma eficiente y a grandes velocidades, por medio de la utilización de haces de luz y el fenómeno de reflexión interna total. El concepto de conducir luz dentro de un conducto largo y estrecho se conoce desde hace bastante tiempo. John Tyndall (1870) demostró que una fina corriente de agua podía contener y guiar la luz. Poco después se recurrió a tubos luminosos de vidrio, y, sucesivamente, a hilos de cuarzo fundido para demostrar posteriormente dicho fenómeno. Después de la invención del láser se valoraron en seguida los beneficios potenciales proporcionados por la transmisión de información recurriendo a la luz, en comparación con las corrientes eléctricas e incluso las microondas. A frecuencias ópticas del orden de 10^{15} Hz, se puede transportar cien mil veces más información con respecto a las microondas [54]. En 1970, los investigadores de Corning Glass Works produjeron una fibra de silicio con un poder de transmisión de las señales de más del 1% en una distancia de un Km, que podía compararse con los sistemas eléctricos de cobre existentes en aquel entonces. Durante las dos décadas que siguieron, la transmisión alcanzó aproximadamente un 96% en un Km.

Debido a su transmisión con bajas pérdidas, su capacidad para transportar mucha información, su pequeño tamaño y peso, su inmunidad a la interferencia electromagnética, su inigualable seguridad en las señales, y la abundancia de los materiales necesarios para su manufactura, la fibra de vidrio ultrapura se ha convertido en uno de los principales medios de comunicación.

Por otro lado, hablando de su estructura, la superficie lisa de la fibra de vidrio individual debe mantenerse limpia de humedad, polvo, aceite, etc., si se desea evitar la fuga de luz (a través de la reflexión interna total frustrada). De manera parecida, si un gran número de fibras ópticas se empaquetan muy próximas entre sí, la luz puede pasar de una fibra a otra; a este fenómeno se le conoce como comunicación cruzada. Por estas razones se suele revestir cada fibra óptica con una vaina transparente de índice más bajo, llamado revestimiento. La figura 41 muestra cómo se refleja la luz en una fibra óptica con revestimiento [54].

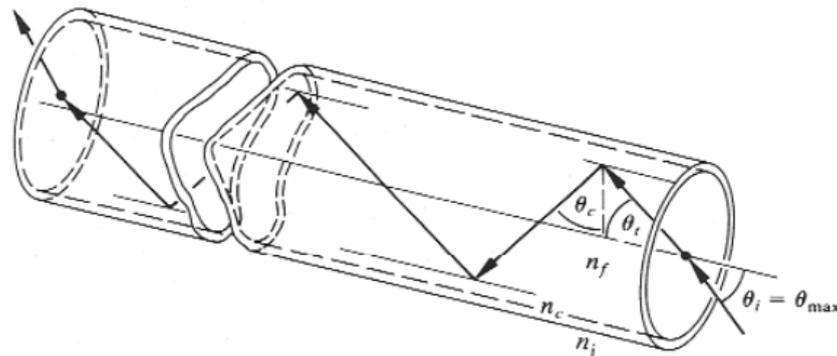


Figura 41. Muestra la transmisión de la luz a través de una fibra óptica [54].

2.1.7 Apertura numérica

La apertura numérica es un parámetro que nos ayuda a conocer el ángulo máximo que puede tener la fuente de luz para que la luz pueda ingresar y ser transmitida por una guía de onda o una fibra óptica sin que esta se escape. Este parámetro considera el índice de refracción del ambiente (por lo regular aire), el índice de refracción del núcleo de la guía de onda, y el índice de refracción del recubrimiento de la misma. Para poder entender y deducir este concepto, consideremos la figura 42 [56].

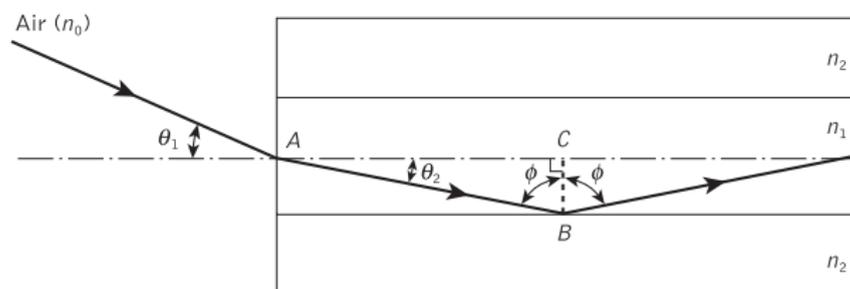


Figura 42. Muestra un bosquejo de una guía de onda y la trayectoria que sigue la luz al ser transmitida [56].

Los índices de refracción del aire, del núcleo y del recubrimiento son "N0", "N1", "N2" respectivamente. Para que se dé el fenómeno de reflexión interna total, como se comentó

anteriormente, el índice de refracción del núcleo tiene que ser mayor al índice de refracción del recubrimiento.

Al observar la cara donde entra el haz de luz a la guía de onda, podemos darnos cuenta de que el haz de luz tiene que atravesar la interfase de aire-núcleo, por lo que el comportamiento de este haz está dado por la ley de Snell:

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta_2$$

Considerando el triángulo rectángulo ABC indicado en la figura 42, entonces:

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \theta_2$$

donde ϕ es mayor que el ángulo crítico en la interfaz núcleo-recubrimiento. Por lo tanto, la ecuación se convierte en:

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \cos \phi$$

Usando la relación trigonométrica $\sin^2 \phi + \cos^2 \phi = 1$, la ecuación puede escribirse en la forma:

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 (1 - \sin^2 \phi)^{\frac{1}{2}}$$

Cuando se considera el caso límite para la reflexión interna total, ϕ se vuelve igual al ángulo crítico para la interfaz núcleo-revestimiento. También en este caso límite, θ_1 se convierte en el ángulo de aceptación para la fibra θ_a . Combinando estos casos límite en las ecuaciones anteriores, tenemos la siguiente ecuación:

$$n_0 \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}$$

A esta última relación se le conoce como "Apertura numérica", comúnmente abreviada con las letras "NA" debido su nombre en inglés "Numerical Aperture". La NA también se puede dar en términos de la diferencia relativa del índice de refracción Δ entre el núcleo y el recubrimiento, que se define como:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

$$\simeq \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{for } \Delta \ll 1$$

Combinando esta última relación con las ecuaciones anteriores obtenemos:

$$NA = n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}}$$

2.1.8 Principio de Beer-Lambert

La Ley de Beer - Lambert relaciona la potencia radiante en un haz de radiación electromagnética, generalmente luz ordinaria, con la longitud de la trayectoria del haz en un medio absorbente y con la concentración de las especies absorbentes, respectivamente. Las leyes se combinan normalmente en la relación [57] :

$$A = -\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) = \varepsilon Cl$$

o bien:

$$I = I_0 10^{-\varepsilon Cl}$$

Donde:

A = Absorbancia, también llamado como la densidad óptica.

I = Intensidad luminosa

ε = Absorción

l = Longitud del haz en el medio absorbente

C = Concentración de las especies absorbentes.

Esta ley es muy importante para el análisis de colorimetría y espectrofotometría en general, sin embargo, esta ley es muy poco abordada y casi no se trata en el sentido matemático en la mayoría de los libros de química física, análisis cuantitativo y análisis instrumental.

La absorbancia, como veremos más adelante, es uno de los principios fundamentales del funcionamiento de los sensores blandos basados en guías de onda, ya que gracias a esta podemos relacionar la atenuación de la luz con la deformación del sensor.

2.1.9 Sensores ópticos

Debido a que los sensores blandos basados en guía de onda no son capaces de detectar un cambio en una variable de estado por sí solos, es decir, necesitan un arreglo de sensores para poder detectar el cambio de una variable, explicaremos brevemente los diferentes sensores ópticos que podrían ser utilizados en una guía de onda.

Los sensores ópticos son sensores que son capaces detectar la presencia de radiación electromagnética en un rango de valores de longitud de onda cercanos a los de la luz visible. Comúnmente, este tipo de sensores son utilizados en encoders, en los que el emisor de luz infrarroja y el elemento fotosensible (ya sea fotodiodo o fototransistor) se encargan de detectar el cambio de posición de un disco ranurado en secciones opacas y transparentes; asimismo, también son muy utilizados en sensores de presencia, como auxiliares de contadores en líneas de producción, cronómetros, etcétera. Dentro de los sensores ópticos, podemos clasificarlos como sensores de luz, sensores de color y sensores de visión [58]. La figura 43 muestra un mapa conceptual de la clasificación de estos sensores.

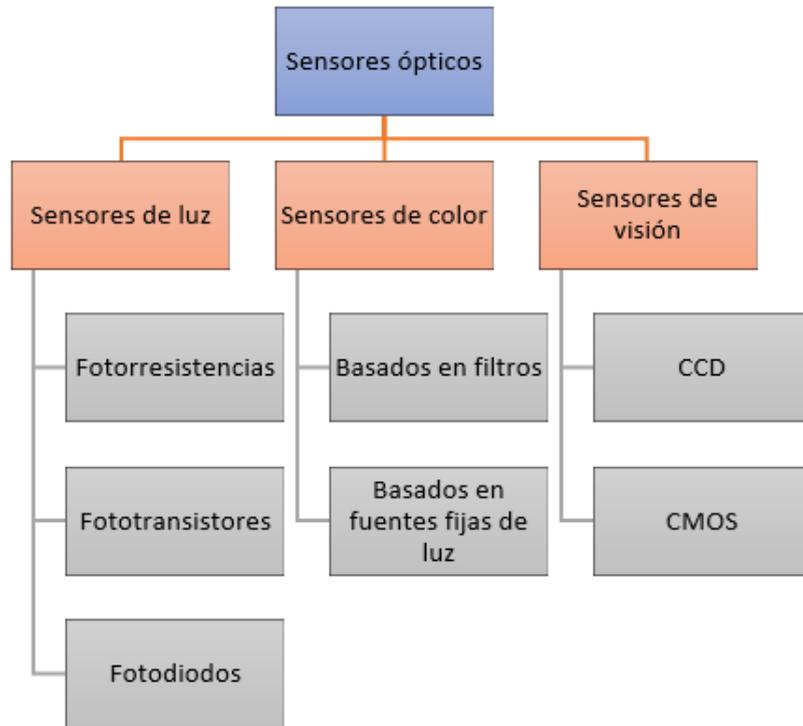


Figura 43. Muestra la clasificación general de los sensores de luz, color y visión

Para el caso de los sensores blandos basados en guías de onda, los sensores ópticos que se utilizan son los sensores de luz, ya que solo se desea detectar y medir la luz que es transmitida por la guía de onda. A continuación daremos una breve descripción del principio de funcionamiento de los sensores ópticos que detectan la intensidad luminosa:

Fotorresistencia: También llamado fotorresistor o fotoconductor, es un componente electrónico cuya resistencia se modifica con el aumento de intensidad de luz incidente. Su cuerpo está formado por una célula fotorreceptora y dos patillas. Este tipo de sensores son fabricados con materiales semiconductores sobre sustratos cerámicos. Al igual que todos los semiconductores, los materiales con los que están fabricadas las fotorresistencias presentan distintos mecanismos de excitación; por ejemplo, un semiconductor no solo genera pares electrón-hueco al ser conectado en un circuito cerrado que contiene una batería, sino que además estos pueden ser activados térmicamente o por medio de una radiación óptica. En un semiconductor, la cantidad de pares electrón-hueco libres para la conducción determina la conductividad de dicho material y, por tanto, varía la resistividad del mismo. Una fotorresistencia se basa en este último principio físico: al incidir una fuente de luz sobre el semiconductor, el número de pares electrón hueco libres para la conducción aumenta, por lo que la resistividad del material se ve disminuida; si esta resistencia variable se conecta a una batería con un valor determinado, se tiene como resultado un cambio en la corriente eléctrica del circuito. Debido a que la variable física que suele medirse con este tipo de sensores es la irradiación, se buscan materiales semiconductores que presenten comportamientos apropiados a temperatura ambiente, con el fin de reducir el ruido inducido en la señal debido a mecanismos de activación térmica. Entre los semiconductores más

utilizados para este tipo de sensores se encuentran el sulfuro de cadmio (CdS) y el seleniuro de cadmio [58] .

Fototransistor: Utilizando una definición basada desde el punto de vista relacionado con la detección de una variable física, un fototransistor es un transductor entre la luz y una señal eléctrica que indica la presencia o ausencia de dicho haz. Pero desde un punto de vista más jerárquico, podemos definir a un fototransistor como un transistor sensible a la luz, normalmente a los infrarrojos, en el cual la luz incide sobre la región de base, generando portadores en ella, llevándolo así al estado de conducción. En configuraciones más especializadas, la señal eléctrica emitida por dicho sensor indica la distancia entre el emisor de luz y cierto objeto, cambios en la superficie reflectante del mismo o el color de dicha superficie. Un fototransistor convierte la energía contenida en un fotón en portadores de carga, de tal manera que por cada fotón percibido se genera un par electrón-hueco, agregando a este efecto una ganancia en corriente de la misma manera que en un transistor común. Al conectar una fuente de voltaje en el circuito base-emisor-colector se busca que la unión base-emisor sea polarizada en inversa, con la finalidad de que, al percibir una fuente de luz en la base, se genere una corriente fotoinducida.

En general, este dispositivo cuenta con dos terminales: el emisor y el colector, debido que en estos la base ha sido sustituida por un elemento fotosensible, en el cual se presenta el efecto fotoeléctrico; asimismo, también existen dispositivos que cuentan con una tercera terminal correspondiente a la base, aunque estos son menos comunes, la cual solo se usa para establecer un punto de operación.

Existe una pequeña cantidad de corriente eléctrica que fluye por el transistor cuando no hay luz presente. Esta corriente se conoce como corriente de oscuridad y es generada por un bajo número de portadores que son inyectados al emisor debido a los efectos de amplificación propios del transistor.

Un fototransistor tiene la desventaja de presentar un bajo desempeño a altas frecuencias, debido a que tiene un ancho de banda limitado a causa de los efectos capacitivos presentes en la estructura, pues, como se dijo antes, al requerir una gran área para maximizar el efecto fotoeléctrico, las capacitancias parásitas también se incrementan en mayor medida; para el caso de un transistor con homounión, el ancho de banda está alrededor de los 250 KHz, mientras que en un fototransistor de heterounión el ancho de banda llega a ser de 1 GHz [58].

Fotodiodo: Es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Para que su funcionamiento sea correcto se polariza inversamente, con lo que se producirá una cierta circulación de corriente cuando sea excitado por la luz. Debido a su construcción, los fotodiodos se comportan como células fotovoltaicas, es decir, iluminados en ausencia de una fuente exterior de energía generan una corriente muy pequeña con el positivo en el ánodo y el negativo en el cátodo.

Para explicar el principio de funcionamiento de un fotodiodo, consideremos una unión pn (la de un diodo común). Si la unión está polarizada en directa, es decir si el lado **p** se conecta a la terminal positiva de la fuente de voltaje y el lado **n** se conecta a la terminal negativa del voltaje, una corriente circulará a través del diodo; cuando el diodo se expone a la luz, entonces su corriente tendrá un incremento despreciable con respecto a la corriente que circula por la unión, debido a la fuente de voltaje, y se comportará como un diodo común. Ahora, considere que el diodo es polarizado en inversa; la corriente de oscuridad del diodo será muy pequeña. Cuando en este se presente el fenómeno fotoeléctrico (es decir, que

debido a la presencia de fotones se generen pares electrón-hueco), la corriente se incrementa de manera notable; esto se debe a que los electrones generados por el efecto fotoeléctrico estarán fluyendo en dirección a la terminal positiva de la fuente de voltaje, con lo que se genera un flujo de corriente de huecos en dirección a la terminal negativa de la fuente de voltaje [58] .

Para el caso de la construcción de sensores blandos basados en guías de onda, el sensor óptico más utilizado es el fotodiodo. La figura 44 muestra los sensores ópticos que detectan la intensidad de luz con su respectivo símbolo.

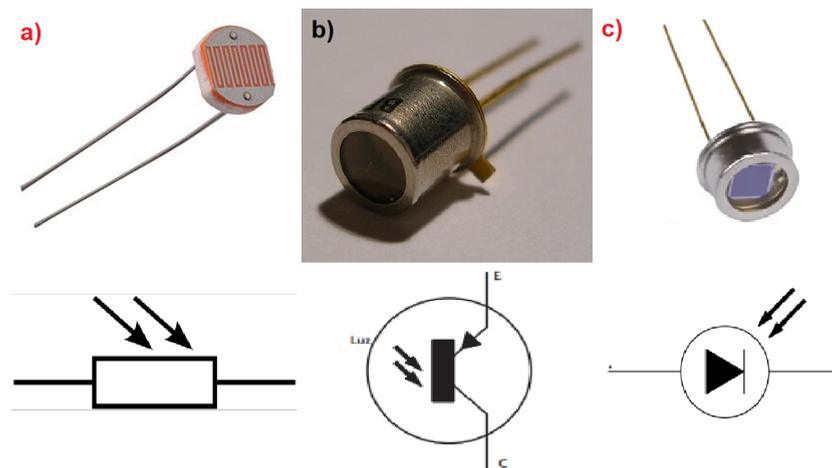


Figura 44. a) Muestra una fotorresistencia, b) Muestra un fototransistor, c) Muestra un fotodiodo

2.1.10 Guías de onda

Cualquier estructura que transporte ondas electromagnéticas puede considerarse como una guía de ondas. Sin embargo, la mayoría de las veces, este término se refiere a estructuras metálicas o dieléctricas que transportan energía electromagnética sin la presencia de una ruta de circuito completa. Las guías de ondas que constan de conductores y dieléctricos (incluido el aire o el vacío) se denominan guías de ondas metálicas. Las guías de ondas que consisten únicamente en materiales dieléctricos se denominan guías de ondas dieléctricas. Las guías de ondas de metal utilizan las propiedades reflectantes de los conductores para contener y dirigir las ondas electromagnéticas. En la mayoría de los casos, consisten en un cilindro largo de metal lleno de un dieléctrico homogéneo. Las guías de ondas más complicadas también pueden contener múltiples dieléctricos y conductores. Los cilindros conductores suelen tener secciones transversales rectangulares o circulares, pero también se pueden utilizar otras formas para aplicaciones especializadas. Las guías de ondas de metal proporcionan transporte con pérdidas relativamente bajas en una amplia gama de frecuencias, desde RF hasta frecuencias de ondas milimétricas. Las guías de ondas dieléctricas guían las ondas electromagnéticas utilizando los reflejos que se producen en las interfaces entre materiales dieléctricos diferentes. Pueden construirse para usarse en frecuencias de microondas, pero se usan más comúnmente en frecuencias ópticas, donde pueden ofrecer una propagación con pérdidas extremadamente bajas. Las guías de ondas dieléctricas son más comúnmente utilizadas en el área de las comunicaciones. Los resonadores son recintos metálicos o dieléctricos que presentan fuertes resonancias a

frecuencias que se pueden controlar eligiendo el tamaño y el material de construcción del resonador. Son análogos electromagnéticos de circuitos resonantes agrupados y se utilizan normalmente en frecuencias de microondas y superiores. Los resonadores se pueden construir utilizando una gran variedad de recintos con formas, pero generalmente se eligen formas simples para que sus frecuencias resonantes puedan predecirse y controlarse fácilmente. Las formas típicas son cilindros rectangulares y circulares [59].

2.1.11 Tipos de manufactura

En la actualidad se han desarrollado muchas soluciones ingeniosas para el desarrollo de dispositivos blandos. Estos desarrollos han demostrado que los avances en el campo de la robótica blanda están muy relacionados con la innovación en el campo de la manufactura, el diseño y la fabricación. Debido a la baja dureza de los materiales utilizados en la robótica blanda, la mayoría no son aptos para ser sometidos a algunos métodos de manufactura convencionales, como podría ser la manufactura sustractiva, ya que las deformaciones en el material podrían causar imprecisiones en la generación de la geometría o concentradores de esfuerzos. Sabiendo esto, los investigadores han implementado nuevos métodos de manufactura para conseguir mejores propiedades en los materiales, así también como diferentes tipos de respuesta. Dentro de los métodos de manufactura utilizados en la actualidad para la fabricación de dispositivos blandos se encuentran los siguientes [60].



Figura 45. Diferentes tipos de manufactura utilizados actualmente en la robótica blanda.

2.1.11.1 Moldeo

Este tipo de manufactura probablemente sea la más utilizada para manufacturar dispositivos blandos por su facilidad y practicidad. El moldeo consiste en la elaboración de un molde, el cual contiene la forma negativa del cuerpo, para que sobre este pueda ser vertido el material con el que va a estar hecha la geometría. Generalmente el material utilizado para la elaboración de dispositivos blandos es silicón, debido a su dureza y propiedades mecánicas. El silicón utilizado para este proceso está compuesto de dos sustancias, las cuales al ser mezcladas provocan una reacción catalítica del proceso de reticulación. Una vez que son mezcladas las dos partes del silicón, este es vertido en el molde para que este tome su forma. Cuando la silicona se ha curado por completo, se extrae el cuerpo blando del molde para seguir con el proceso de manufactura.

La forma más sencilla de realizar el moldeo de un cuerpo blando es mediante el método llamado “por gravedad”. Este método, como su nombre lo indica, solo utiliza la fuerza generada por el propio peso del cuerpo para que este tome la forma del molde. A pesar de que este método es el más sencillo de realizar, presenta algunas desventajas como la limitación de la geometría del cuerpo en función de la facilidad de desmoldeo y los posibles puntos débiles que podría presentar el cuerpo causadas por la acumulación de aire en el silicón. Para evitar esta última, se recomienda que después de realizar la mezcla del silicón, éste sea introducido en una cámara de vacío para extraer todo el aire acumulado. Otros de los métodos utilizados para manufacturar un cuerpo por medio de moldeo podrían ser centrífugo, (vacuum casting, pressure casting), moldeo por inmersión y moldeo rotacional.

El moldeo centrífugo consiste en introducir el molde en una máquina que está diseñada para girar a altas velocidades. El objetivo de esta acción es generar una aceleración normal superior a la gravedad en el silicón para que se ejerza más presión sobre el molde. Este método tiene la ventaja de que no es necesario aplicar un proceso de extracción de gas en la cámara de vacío y se puede obtener una mejor resolución en el cuerpo blando. El *moldeo por inmersión*, como su nombre lo indica, es utilizado para generar cuerpos por medio de introducir un molde en silicón para que este se quede pegado y adquiera su forma. La inmersión del molde se repite tantas veces como se desee que sea el espesor de las capas del cuerpo. Este tipo de manufactura es utilizado en la industria para la elaboración de balones y globos y sopladores (fuelles). Por último se encuentra el *moldeo rotacional*. Este método consiste en colocar un molde en una máquina que es capaz de hacerlo girar sobre los tres ejes coordenados. El propósito de este movimiento es provocar que el material colocado en el interior del molde se adhiera lentamente a las paredes del molde, modificando la forma en la que incide el campo gravitacional sobre el este. Por lo tanto, este método es perfecto para manufacturar cuerpos huecos de una sola pieza. Como se podrá dar cuenta, el método de moldeo rotacional se parece mucho el método por inmersión, ya que el material se va adhiriendo lentamente al molde por medio de capas, con la única diferencia de que el moldeo rotacional adhiere las capas de forma interna y el moldeo por inmersión de forma externa [60]. La figura 46 muestra los métodos de moldeo mencionados.

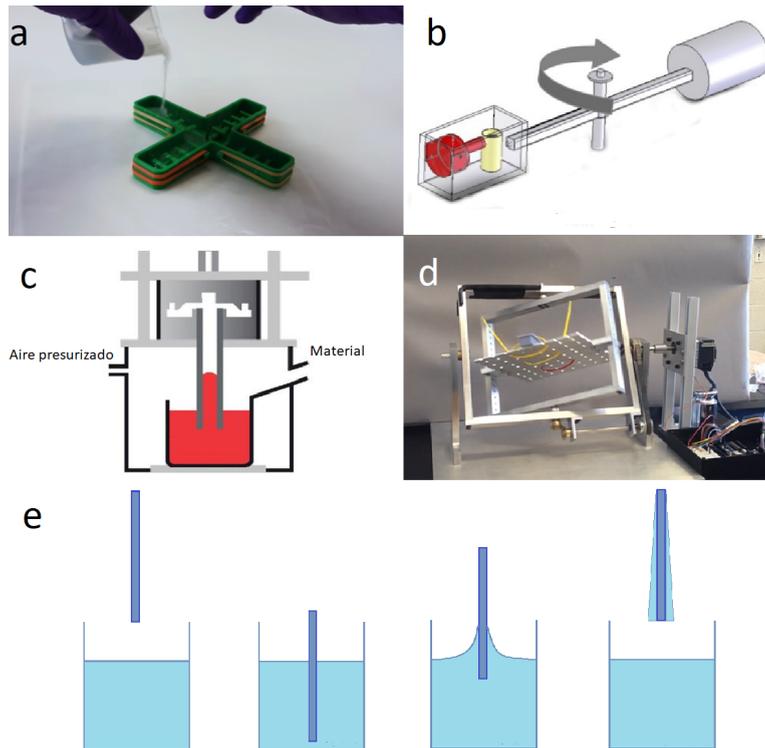


Figura 46. Muestra a) Moldeo por gravedad, b) Moldeo centrífugo, c) Pressure casting, d) Moldeo rotacional, y e) Moldeo por inmersión

2.1.11.2 Manufactura por refuerzos

Este tipo de manufactura principalmente se utiliza para complementar las propiedades del cuerpo blando. La manufactura por refuerzos consiste en generar cambios de geometría, modificar el espesor de las paredes, y agregar materiales los cuales modifiquen la rigidez y comportamiento del cuerpo. Este método es ampliamente utilizado para el desarrollo de actuadores neumáticos, los cuales sólo presentarían una respuesta de expansión si no se controla el espesor y rigidez de cada una de las partes del cuerpo del actuador. Por ejemplo, para el caso de los actuadores neumáticos que presentan una respuesta de curvatura, estos generalmente tienen un refuerzo en una de sus caras para aumentar la dureza de la misma y por lo tanto su deformación y comportamiento. Al tener una cara con mayor rigidez, el actuador neumático presenta más deformación en las caras que no están reforzadas al ser presurizado, lo cual provoca que este se curve. Para el caso de los actuadores neumáticos que presentan una respuesta de contracción (comúnmente llamados músculos neumáticos), estos son reforzados por una malla la cual tiene la cual mantiene su superficie constante. Entonces, al estar restringida la expansión en los extremos del cuerpo, el actuador solo se puede expandir de forma transversal, lo cual provoca una contracción longitudinal al ser presurizados. Para el caso de los actuadores neumáticos con respuesta de torsión, también se controla la geometría de las cámaras y rigidez de las paredes para lograr esta respuesta. La figura 13 ejemplifica las diferentes respuestas de los actuadores neumáticos. Este tipo de manufactura puede ser aplicado a cualquier tipo de actuador blando.

2.1.11.3 Manufactura aditiva.

A diferencia de los métodos clásicos de maquinado, también llamados métodos de manufactura sustractiva, donde una herramienta remueve material del espacio de trabajo para generar la forma requerida, la manufactura aditiva es basada en la deposición local de pequeñas cantidades de material en función de la forma de la geometría. Los primeros desarrollos en manufactura aditiva se produjeron por el *modelado por deposición fundida*. Este método consiste en fundir un filamento de material termoplástico para después depositarlo de manera controlada, capa por capa, en una superficie. El sistema que se utiliza para llevar a cabo este método de manufactura aditiva está compuesto por un módulo de extrusión y uno de posicionamiento. El módulo de extrusión está compuesto de un cabezal, el cual se encarga de fundir el material de aporte, y un motor que se encarga de controlar el flujo de material que llega al extrusor. El módulo de posicionamiento, para el caso de un sistema cartesiano, está compuesto básicamente de tres motores, uno para cada eje coordinado, los cuales se encargan de colocar el material extruido en la posición deseada. Actualmente es posible generar geometrías con materiales como elastómeros, metales, cerámicas, o alguna combinación de los anteriores en una sola pieza.

Uno de los métodos de manufactura aditiva más utilizados en la actualidad para la creación de dispositivos blandos es la *fotopolimerización*, también comúnmente llamada foto-solidificación o estereolitografía. Las altas resoluciones alcanzadas por este método repercuten directamente en las propiedades mecánicas del material, y, aunada a su gran practicidad, justifican su popularidad. Este método de manufactura consiste en la formación de un cuerpo tridimensional por medio de la reticulación sucesiva de capas de material. La reticulación es causada por la exposición a una fuente de luz ultravioleta, por lo que se experimenta el fenómeno de fotopolimerización. Dependiendo de la configuración del sistema, la plataforma es la que se encarga de posicionar y humedecer la superficie del cuerpo para después ser expuesta a la luz ultravioleta. La luz es proyectada sobre la superficie de la plataforma siguiendo la forma que tiene que tener cada una de las capas del cuerpo. Por último, la plataforma realiza un movimiento adicional para asegurar que la capa más superficial esté humedecida y procede a posicionar el cuerpo en la posición indicada para continuar con el proceso.

Otro de los métodos utilizados para la manufactura de dispositivos blandos es la manufactura aditiva por *escritura de tinta directa* (Direct Ink Writing DIW). Este método es muy parecido al utilizado al método de modelado de posición fundida, ya que pueden implementar el mismo sistema de posicionamiento, la única diferencia entre estos dos sistemas radica en el cabezal. Mientras que el cabezal en el sistema de fusión se encarga de controlar la temperatura con la que se está trabajando el material y depositarlo, en el sistema de escritura directa se utiliza un material que no necesita ser fundido para ser depositado, ya que este se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente y presenta una alta viscosidad. Haciendo analogía con un instrumento conocido, el cabezal de las máquinas de escritura por tinta directa es muy parecido a una jeringa. Este método ha sido utilizado principalmente por materiales que optimizan sus propiedades y funcionalidad, como podría ser el caso de materiales cerámicos [61] o metales líquidos. En el campo de la robótica blanda este método no es muy utilizado para la manufactura de cuerpos blandos debido a la baja resolución y bajas propiedades mecánicas, sin embargo, este resulta muy

útil para la integración de circuitos hechos de materiales conductores adaptables, como podrían ser metales líquidos o geles conductores, al interior de un cuerpo blando [62].

2.1.11.4 Bonding

Este tipo de manufactura, al igual que la manufactura por refuerzas, se utiliza para complementar las propiedades de un cuerpo blando o crear geometrías complejas que no podrían ser creadas por ningún método antes mencionado. Este método consiste en adherir dos o más componentes para obtener la geometría o respuesta deseada. Los cuerpos blandos que son diseñados por este método de manufactura por lo general están hechos de silicón, ya que se puede utilizar el mismo material como adhesivo al unir dos partes sin alterar su comportamiento. Por ejemplo, algunos diseños de actuadores neumáticos integran en su estructura materiales textiles, los cuales son utilizados como soporte y para controlar la respuesta. Estos materiales pueden ser integrados al mismo tiempo en el que se está realizando el curado de la pieza principal o pueden ser adheridos una vez curados. La figura 47 muestra el proceso de desarrollo de un actuador neumático por medio de este método. Dentro de las desventajas que puede presentar este método están los concentradores de esfuerzos generados por las imperfecciones en las uniones y la compatibilidad de los materiales adherentes con el cuerpo. Por lo tanto, este método es poco recomendable para materiales que no puedan presentar uniones homogéneas o con superficies poco adherentes.

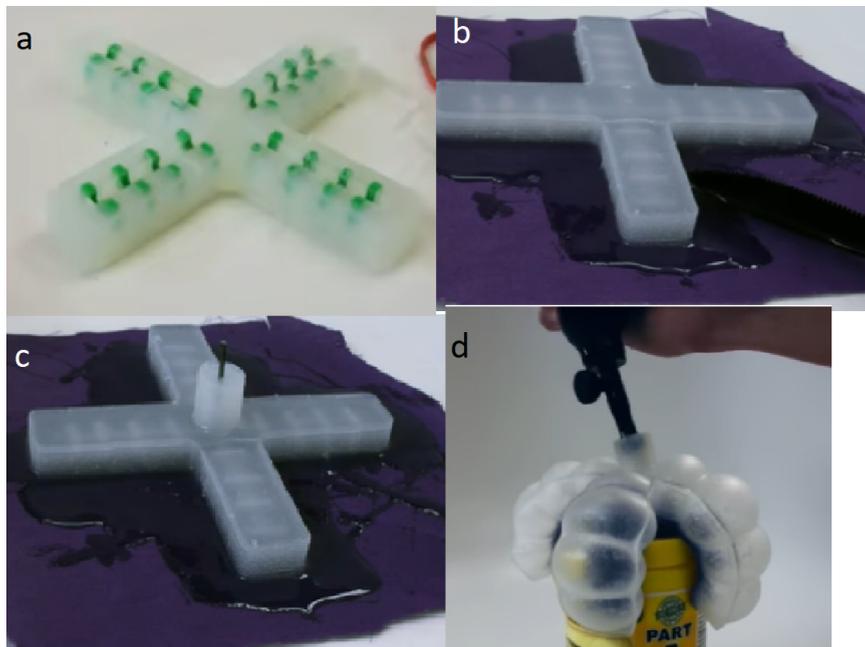
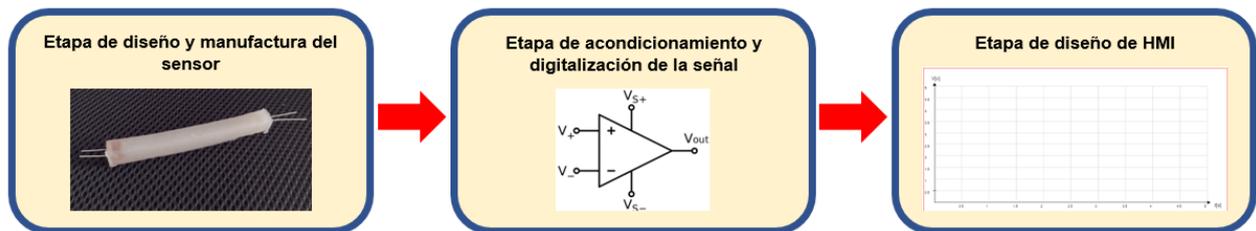


Figura 47. Desarrollo de un actuador neumático por medio de Bonding. a) muestra la parte principal, b) muestra la adhesión del material textil, c) muestra la adhesión del canal de aire, d) muestra el funcionamiento del actuador.

3. DESARROLLO

Para describir el proceso que se siguió para el desarrollo el sistema y abordar los requerimientos del sistema de forma ordenada, el sistema de fue dividido en los siguientes etapas:



3.1 Diseño y manufactura del sensor

El diseño y manufactura del sensor blando basado en guía de onda fue un proceso iterativo, ya que detectamos que algunas partes de los diseños propuestos en la literatura presentaban algunos inconvenientes al momento de manufacturarlos. En general, el número de prototipos que se realizaron hasta llegar al prototipo con mejor desempeño fueron tres.

Nuestro primer prototipo de guía de onda fue hecho con una forma transversal rectangular. El núcleo de la guía de onda se diseñó con dimensiones de 4x4 [mm], mientras que el recubrimiento fue de 2 [mm], por lo tanto, el área total transversal fue de 8x8 [mm]. La longitud de la guía de onda fue de 120 [mm]. La figura 48 muestra la forma y las dimensiones de la guía de onda.

Los materiales que se utilizaron para su fabricación fueron los elastómeros “VytaFlex 20, (Smooth-On Inc)” para el núcleo, y el “Ecoflex 00-30 (Smooth-On Inc)” para el recubrimiento. La razón principal por la que se utilizó la silicona “Ecoflex 00-30” en lugar de la silicona “ELASTOSIL M 4601” (qué es la utilizada por [51]) fue que no se pudo conseguir esta silicona. Sin embargo, las propiedades mecánicas y ópticas (aproximadamente $n=1.4$) del “Ecoflex 00-30” son las suficientes para lograr manufacturar una guía de onda. Respecto a los componentes auxiliares del sensor, para este primer prototipo sólo se utilizó un LED de luz blanca.

Para la manufactura de la guía de onda, al igual que como se hizo con el sensor que se tenía de referencia, se utilizó el proceso de “moldeo”. La figura 49a muestra el diagrama del molde utilizado, mientras que la figura 49b muestra la forma del recubrimiento de silicón obtenido.

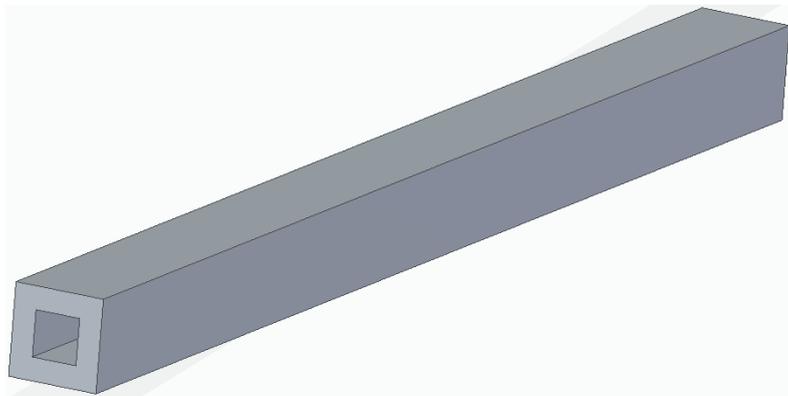
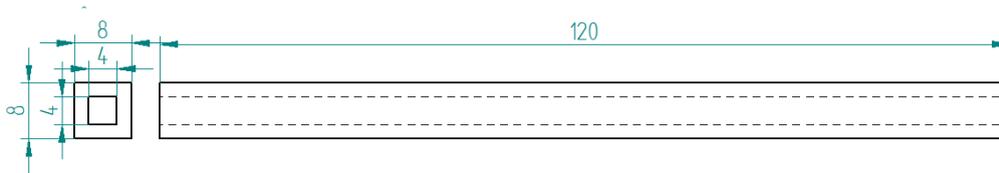
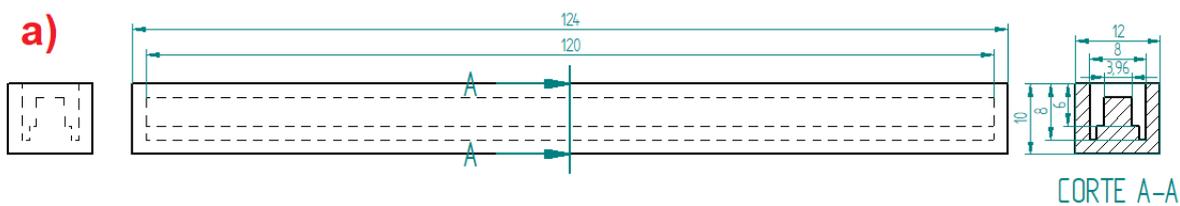


Figura 48. Muestra la forma del cuerpo del sensor basado en guía de onda y sus dimensiones



b)

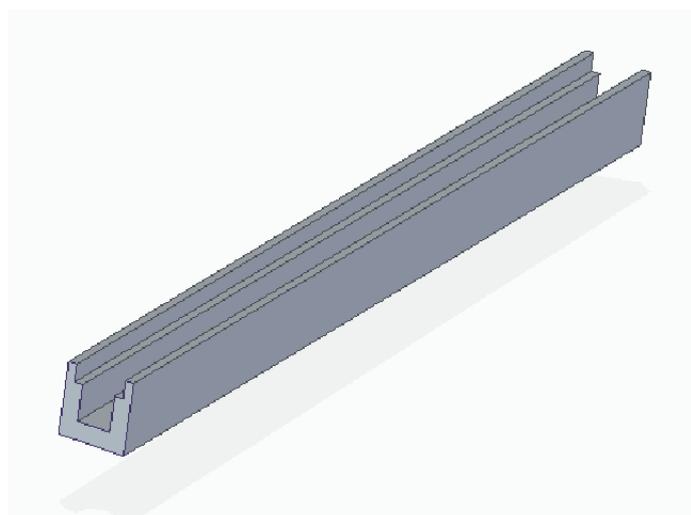


Figura 49. Muestra a) El plano del molde que se utilizó para realizar la primera parte del recubrimiento, y b) muestra el recubrimiento de la guía de onda.

Los pasos que se siguieron para elaborar la guía de onda fueron los siguientes:

1. *Diseño y manufactura del molde*: En este paso se diseñó un molde, el cual fue hecho con manufactura aditiva. La parte positiva del núcleo fue insertada para que después de que terminara de curar el Ecoflex 00-30, se pudiera obtener una parte del recubrimiento en forma de “U”.
2. *Moldeo del recubrimiento de la guía de onda*: En este paso se vacía la silicona Ecoflex 0030 en el molde. El recubrimiento resultante servirá a su vez como molde para integrar los componentes auxiliares y el núcleo.
3. *Instalación de componentes auxiliares*: Se instala en los extremos del recubrimiento el LED blanco, para que quede integrado en la guía de onda después de añadir el núcleo.
4. *Moldeo del núcleo de la guía de onda*: Se vierte el poliuretano VytaFlex 20 en el recubrimiento de silicona hasta llenar la sección rectangular
5. *Bonding*: Por último, la parte que quedó descubierta del núcleo, es sellada con silicona, lo que garantiza la transmisión de la luz.

Después de terminar la guía de onda y hacer observaciones correspondientes, se detectó que este primer prototipo no lograba transmitir la luz del otro extremo de manera eficiente, sin embargo, sí se logró observar el fenómeno. A partir del análisis rápido de este prototipo se hicieron las siguientes observaciones:

- A pesar de que el LED quedaba integrado en el núcleo de la guía de onda, el recubrimiento no proporcionaba el ajuste necesario para que este no se separara del núcleo, lo cual provocaría lecturas imprecisas.
- Las burbujas presentes en el núcleo de la guía de onda influían de manera negativa a la transmisión de la luz.
- El proceso final de “Bonding”, al no tener un límite en los extremos de la guía de onda, provocaba que el espesor del recubrimiento en los extremos fuera menor en comparación con el centro.

El segundo prototipo se diseñó para reproducir y comprobar las lecturas obtenidas en el sensor reportado en el artículo [51], así también para comprobar la correlación con los modelos matemáticos que predicen su comportamiento. Las dimensiones con las que se diseñó este sensor fueron 1x1 [mm] para el núcleo y 2 [mm] de recubrimiento, lo cual nos da un área transversal de 5x5 [mm]. La longitud para este prototipo sensor fue de 80 [mm]. Al igual que el prototipo anterior, esta guía de onda también utilizó el poliuretano Vytaflex 20 para el núcleo, y la silicona Ecoflex 00-30 para el recubrimiento. Respecto a los componentes auxiliares del sensor, se utilizó un LED infrarrojo (longitud de onda ~ 875 nm; TSHA4400, Vishay Intertechnology Inc) y un fotodiodo (380 a 1100 nm; SFH 229, OSRAM Licht AG).

Para este prototipo se utilizó también la manufactura por moldeo, pero para corregir las deficiencias que se detectaron en el primer prototipo, el molde correspondiente al recubrimiento se diseñó para que se generaran dos mitades del recubrimiento, las cuales serán unidas posteriormente con el núcleo por un proceso de bonding. El núcleo también se manufacturó por separado. La figura 50 muestra los planos de los moldes utilizados.

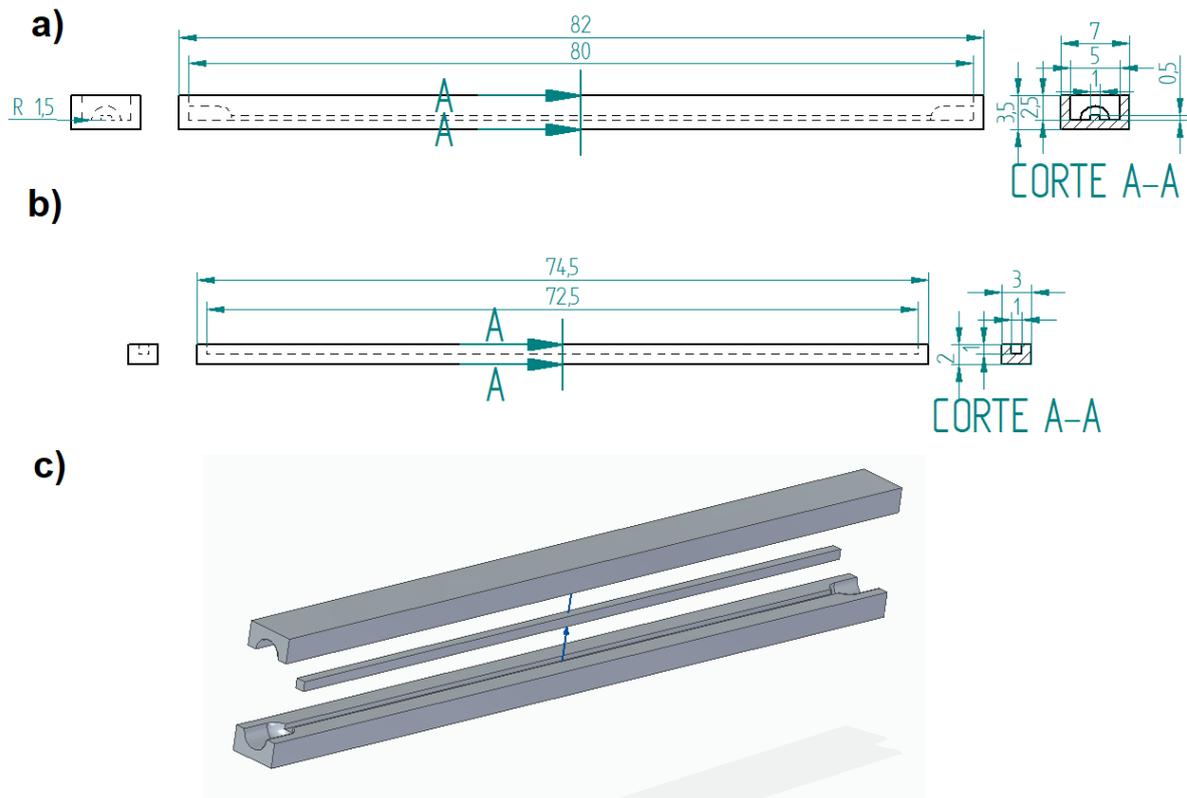


Figura 50: La figura muestra a) las dimensiones del molde del recubrimiento de la guía de onda, b) muestra las dimensiones del molde del núcleo, y c) Muestra la guía de onda separada en cada una de sus partes antes del proceso de bonding

Los pasos que se siguieron para elaborar la guía de onda fueron los siguientes:

1. *Diseño y manufactura del molde de los moldes:* Como se comentó anteriormente, se elaboraron tres moldes: Dos correspondientes a cada una de las mitades del recubrimiento y uno para el núcleo de la guía de onda. Los detalles de los moldes se pueden observar en la figura 50.
2. *Moldeo de los componentes de la guía de onda:* En este paso se mezclaron y vaciaron los elastómeros en sus moldes correspondientes. Para que no se presentara el problema con la transmisión de la luz en el núcleo y las propiedades mecánicas en el recubrimiento fueran las mejores, después de ser vaciados los elastómeros se sometieron a un proceso de desgasificación en una cámara de vacío.
3. *Bonding:* Ya que terminaron de curar los elastómeros, cada una de las partes de la guía de onda se colocan en su lugar y se unen utilizando una pequeña cantidad de silicona Ecoflex 00-30.
4. *Instalación de componentes auxiliares:* Se instala en los extremos del cuerpo de la guía de onda el LED infrarrojo y el fotodiodo

Una vez terminado el sensor y habiendo hecho las pruebas necesarias, se pudo comprobar que el sensor reportado en el artículo antes mencionado sí presentaba el comportamiento esperado y sí se ajustaba a los modelos matemáticos que predicen su comportamiento, sin embargo, se identificaron los siguientes inconvenientes:

- Las lecturas entregadas por el sensor no eran precisas debido a que el LED infrarrojo y el fotodiodo, a pesar de estar sujetos por el recubrimiento, se movían o separaban del núcleo al ser sometidos a pruebas de tracción o curvatura
- El sensor infrarrojo no era tan sensible como se esperaba, por lo cual se tenía que amplificar mucho la señal entregada por el sensor.

Para corregir las deficiencias encontradas en el segundo prototipo, se hicieron modificaciones considerables a los moldes donde se formaban el núcleo y el recubrimiento. Ya que era necesario que los componentes auxiliares tuvieran siempre la misma posición al ser sometidos a las diferentes pruebas, se decidió integrar completamente los componentes auxiliares en el núcleo. La geometría del núcleo, debido a la integración de los componentes, ya no presentaba una área transversal constante, debido a que era necesario aumentar el espesor del núcleo en los extremos para que los componentes auxiliares quedarán completamente cubiertos. Los detalles sobre la geometría del núcleo y el recubrimiento de la guía de onda se encuentran en la figura 51 y la figura 52 respectivamente. Respecto a los materiales que se utilizaron para su elaboración, al igual que los dos prototipos anteriores, se utilizó Vitablex 20 para el núcleo y Ecoflex 00-30 para el recubrimiento, sin embargo, para resolver el problema con la poca sensibilidad del sensor, se cambió el sensor infrarrojo por el BPW 34 (430 a 1100 [nm], pico 900 [nm], Vishay).

Para manufacturar este sensor se utilizó una combinación entre las dos formas de moldeo de los prototipos anteriores. Los moldes del recubrimiento fueron diseñados para que se pudiera integrar directamente el núcleo a la hora de vaciar el elastómero. Por lo tanto, el proceso de curado del recubrimiento requiere de dos tiempos: el primero para integrar el núcleo y formar la parte superior del recubrimiento, y la segunda para formar la parte inferior del recubrimiento.

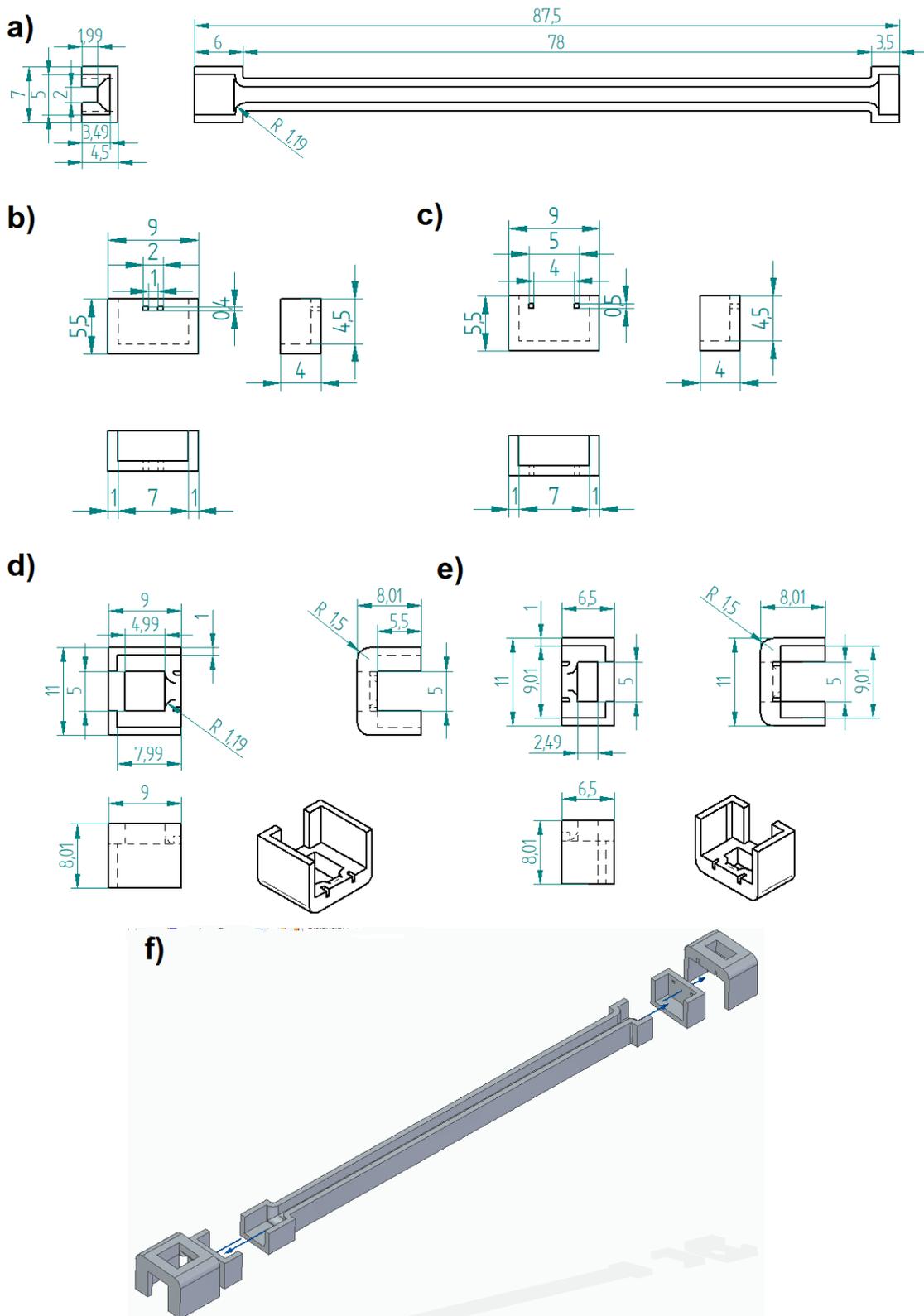


Figura 51. Muestra las partes del molde utilizado para elaborar el núcleo de la guía de onda. a) muestra el cuerpo principal, mientras que b), c), d), y e) muestran las tapas correspondientes al lado del LED infrarrojo y al fotodiodo, y a los complementos de los mismos respectivamente. d) Muestra el ensamble de los componentes.

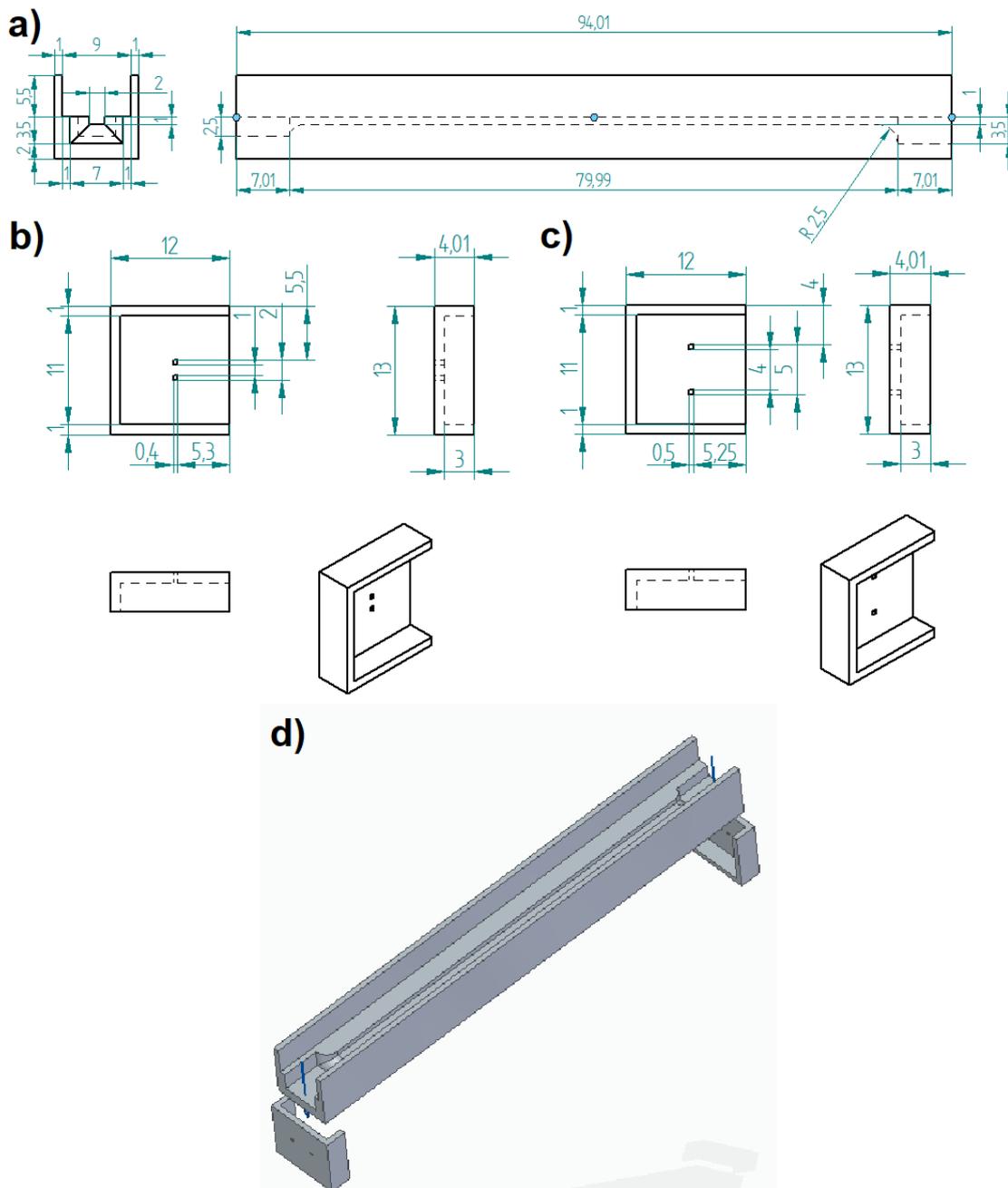


Figura 52. Muestra la geometría de cada una de las partes del primer molde del recubrimiento. a) Muestra el cuerpo principal del molde, mientras que b) y c) muestran las tapas correspondientes al LED y al fotodiodo respectivamente. d) Muestra el ensamble de los componentes.

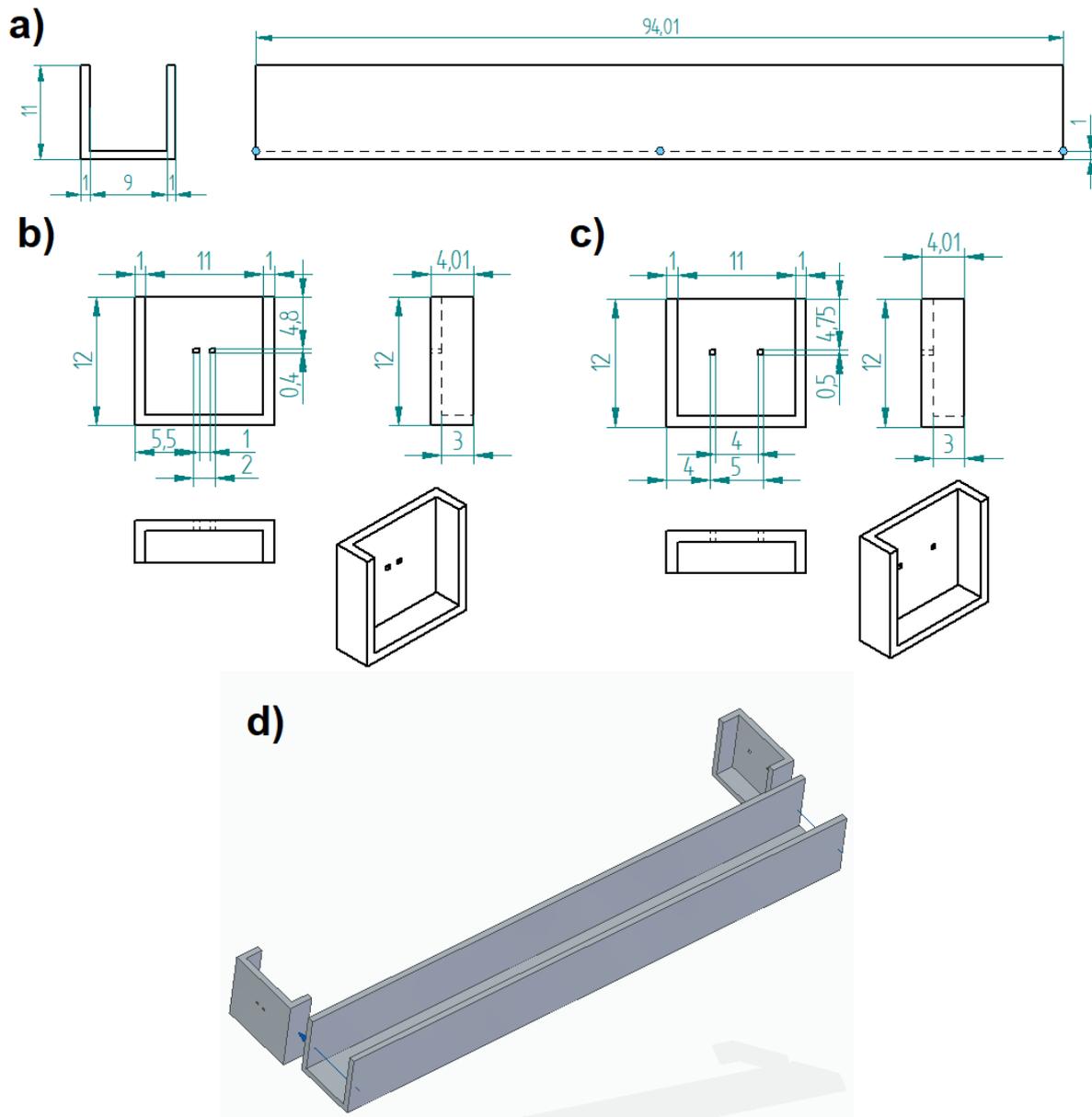


Figura 53. Muestra la geometría de cada una de las partes del segundo molde del recubrimiento. a) Muestra el cuerpo principal del molde, mientras que b) y c) muestran las tapas correspondientes al LED y al fotodiodo respectivamente. d) Muestra el ensamble de los componentes.

Los pasos que se siguieron para elaborar la guía de onda fueron los siguientes:

1. *Diseño y manufactura del molde de los moldes:* Los moldes que se diseñaron para este sensor estuvieron compuestos por diversas partes, las cuales cumplían la función principal de sostener a los componentes auxiliares en la posición predeterminada durante el proceso de curado de los elastómeros. La geometría de los tres moldes utilizados para elaborar el cuerpo de la guía de onda se muestran en las figuras 51, 52, y 53.
2. *Moldeo del núcleo de la guía de onda:* Para elaborar el núcleo se llevaron a cabo tres pasos intermedios, los cuales corresponden a el posicionamiento de los componentes auxiliares, el vaciado del elastómero y la extracción de aire del

elastómero. Entonces, para comenzar con el proceso de manufactura del núcleo, el primer paso es posicionar los componentes auxiliares en el molde. El LED y el sensor infrarrojo son posicionados y fijados al molde gracias a los alambres de alimentación de los componentes y a los pequeños orificios presentes en las tapas (Figura 51b y 51c respectivamente). Ya que están fijos los componentes en el molde, se prepara la mezcla del elastómero y es vaciada en el molde. Para evitar que se tengan pérdidas en la guía de onda generadas por las pequeñas burbujas de aire en el elastómero, el molde es introducido en una cámara de vacío para la extracción del aire de la mezcla. Después de que la mezcla del elastómero ya curó lo suficiente para no presentar fluidez, se colocan los complementos de las tapas en los extremos del molde, se prepara una pequeña cantidad de mezcla del elastómero y se vacía esta mezcla por la parte superior de los complementos. Este último paso sirve para asegurar que los componentes están completamente integrados en el núcleo y para que este sea simétrico.

3. *Moldeo del recubrimiento de la guía de onda:* Como se comentó anteriormente, el recubrimiento del cuerpo de la guía de onda está formado por dos partes. La primera parte de este recubrimiento se realiza colocando el núcleo de la guía de onda en el primer molde. Este primer molde tiene grabado la figura del núcleo (Figura 52a), para que este quede fijo y alineado al momento de vaciar elastómero correspondiente al recubrimiento. Al igual que como se hizo con el molde del núcleo, los componentes auxiliares son posicionados gracias a las tapas (Figura 52b y 52c). Ya que están fijos los componentes y el núcleo, se prepara la mezcla de elastómero correspondiente para el recubrimiento y se vacía en el molde. En esta parte también es sometido el elastómero a un proceso de extracción de aire. Después de que la primera parte del recubrimiento se terminó de curar, la unión es extraída del primer molde y colocada en el segundo molde para elaborar la segunda parte del recubrimiento. Como se muestra en la figura 53, este molde solo funciona para sostener el cuerpo de la guía de onda y limitar la geometría del recubrimiento. Una vez colocado el cuerpo de la guía de onda y fijado los componentes auxiliares en el segundo molde, es preparada la mezcla para el elastómero del recubrimiento y vaciado en el molde. En esta parte también se lleva a cabo un proceso de extracción de aire.

Este tercer prototipo presentó mejores resultados en comparación con el prototipo anterior, ya que aumentó mucho la precisión y la sensibilidad del sensor blando. La figura 54 muestra al sensor blando terminado.

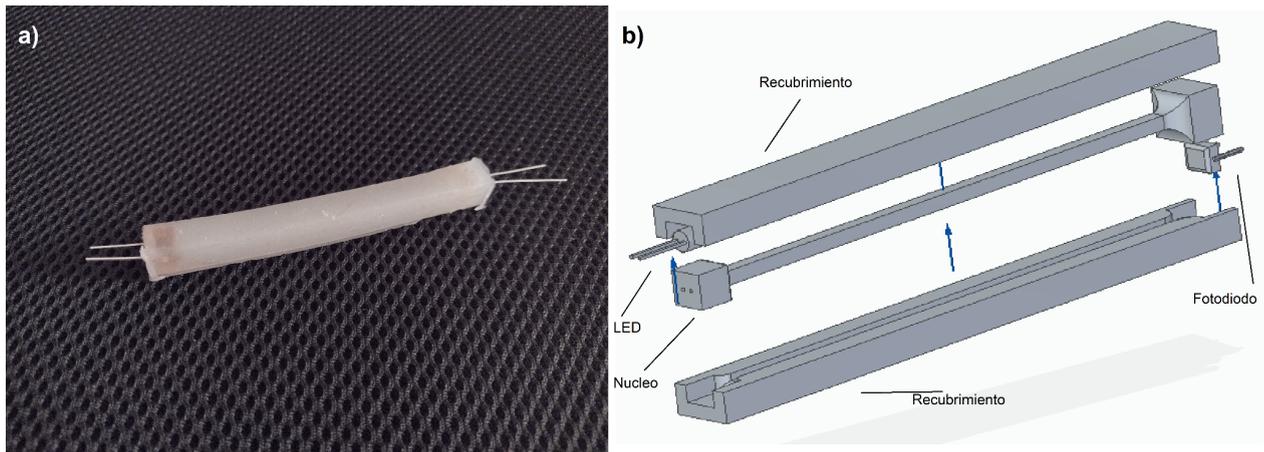


Figura 54. a) Muestra el sensor blando basado en guía de onda, y b) muestra el ensamble de cada uno de sus componentes

3.2 Acondicionamiento y digitalización de la señal

El sistema utilizado para la adquisición de la señal del sensor blando se compone principalmente de dos partes: un circuito analógico para el acondicionamiento de la señal, y un circuito digital que funciona como convertidor analógico digital.

El objetivo del primer circuito analógico es amplificar la señal proveniente del sensor y eliminar una parte del ruido ambiental, ya que la señal que es entregada por el sensor infrarrojo integrado en la guía de onda es muy baja. Para lograr este objetivo, se encontraron en la literatura dos configuraciones de circuitos: el amplificador por voltaje y el amplificador por corriente. El circuito amplificador por voltaje, a pesar de que sea la configuración más intuitiva, presenta algunas desventajas en comparación con su contraparte amplificada por corriente, las cuales son la no linealidad y alto voltaje de offset debido a la corriente de vías. Por esta razón se utilizó el circuito amplificador por corriente, el cual también es llamado *amplificador de transimpedancia (TIA)*. Un amplificador de transimpedancia (TIA) es un convertidor de corriente a tensión que se utiliza para amplificar la salida de corriente de diferentes tipos de sensores a una tensión proporcional.

El circuito amplificador de transimpedancia que se utilizó consta de un fotodiodo, un amplificador y un par de capacitor/resistencia de retroalimentación. El funcionamiento de este circuito es muy simple, la luz que incide en el fotodiodo crea una corriente (I_{pd}) que fluye desde el cátodo del diodo hasta el ánodo. Esta corriente también fluye a través de la resistencia de retroalimentación, R_f . El valor de I_{pd} por R_f crea el voltaje de salida en la salida del amplificador operacional, V_{out} . En este circuito, el aumento de la intensidad luminosa hace que el voltaje de salida se vuelva más positivo [63]. La figura 55 muestra el diagrama de un amplificador de transimpedancia.

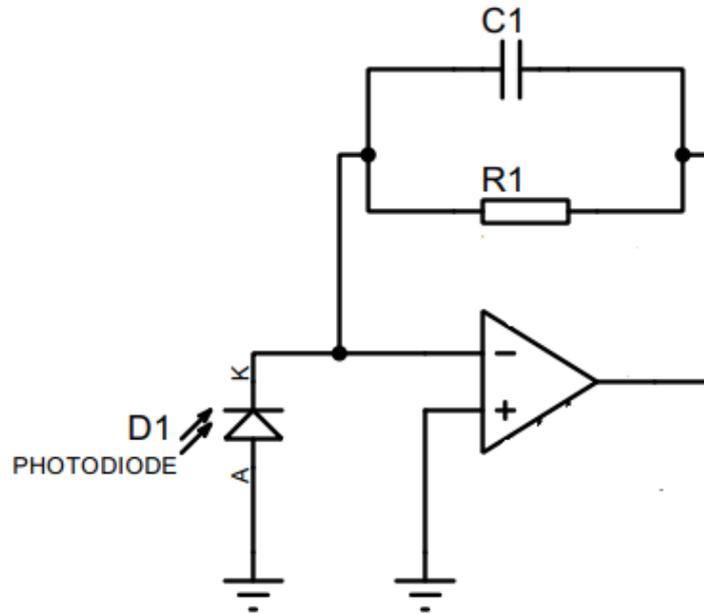


Figura 55. Muestra el diagrama de un amplificador de transimpedancia

Observando el diagrama de la figura 55 y considerando las condiciones ideales para cada uno de los elementos, podemos establecer las siguientes ecuaciones:

$$V_{out} = I_{pd}(Z_{eq})$$

$$Z_{Rf} = R_f ; Z_{Cf} = \frac{1}{C_f \omega i}$$

$$Z_{eq} = \frac{R_f}{1 + R_f C_f \omega i}$$

$$\therefore V_{out} = I_{pd} \left(\frac{R_f}{1 + R_f C_f \omega i} \right)$$

Donde:

V_{out} = Voltaje de salida

I_{pd} = Corriente en el fotodiodo

R_f = Resistencia de retroalimentación

C_f = Capacitor de retroalimentación

ω = Velocidad angular = $2\pi * (\text{Frecuencia})$

Como se puede ver en las ecuaciones anteriores, la corriente que pasa por el fotodiodo es amplificada por el valor de la impedancia de retroalimentación, y al mismo tiempo convertida en voltaje.

La razón principal por la que se le coloca un capacitor en paralelo al resistor de retroalimentación es porque internamente los circuitos que componen al amplificador operacional y al fotodiodo tienen resistencias y capacitancias parásitas, las cuales las cuales pueden causar salidas derivadas y oscilación de timbre, haciendo el circuito inestable [64]. Analizando también la configuración de la impedancia que se tiene en retroalimentación, podemos ver que al colocar el capacitor en paralelo con el resistor obtenemos un filtro pasa bajas, el cual nos ayuda a eliminar el ruido ambiental de alta frecuencia. Para este circuito, la frecuencia de corte se define de la siguiente manera:

$$F_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$$

Si sustituimos los valores de resistencia y capacitancia del circuito, obtenemos la siguiente frecuencia de corte:

$$F_c = \frac{1}{2\pi(1 \times 10^6)(4.7 \times 10^{-9})}$$

$$\therefore F_c = 33.8 \text{ [Hz]}$$

También se utilizó una impedancia igual a la colocada en la retroalimentación del circuito de transimpedancia para reducir la corriente de vías, y por lo tanto el offset [65]. La figura 56 muestra un diagrama del circuito utilizado.

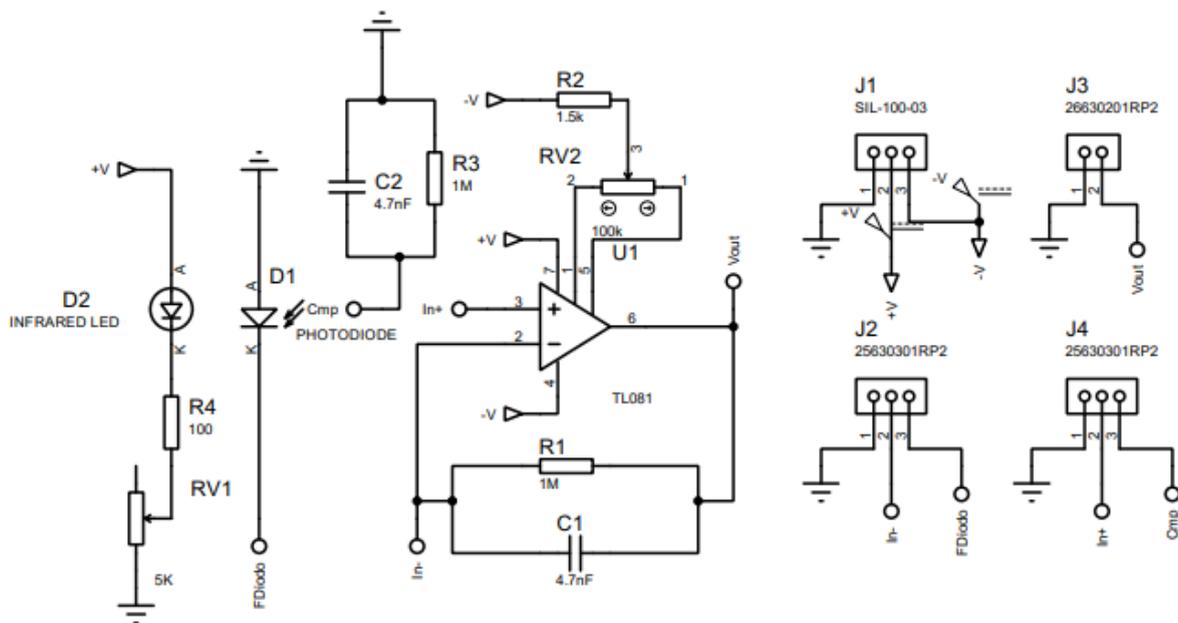


Figura 56. Muestra el diagrama del circuito utilizado para el acondicionamiento de señal.

Cómo se puede ver en la figura 56, el circuito cuenta con dos potenciómetros, los cuales son utilizados para modificar la intensidad del LED infrarrojo (RV1) que se encuentra en el

sensor blando, y para calibrar el voltaje de offset del amplificador operacional si es el caso (RV2). El circuito también cuenta con cuatro grupos de headers. Los dos primeros son los correspondientes a la alimentación del circuito (J1), y para la señal de salida y acoplamiento con el circuito digital (J3), respectivamente. Los últimos dos grupos de headers (J2 y J4) sirven para cambiar la conexión de las entradas del amplificador operacional entre tierra y los componentes del circuito, lo cual nos ayuda a calibrar el voltaje de offset del amplificador operacional. Por otro lado, también se puede observar que la ganancia del amplificador de transimpedancia está fija en 1,000,000 de veces la corriente que circula por el fotodiodo.

Los componentes utilizados para la elaboración del circuito mencionado se muestran en la siguiente tabla:

Componente	Referencia	valor	Descripción
Capacitor	C1, C2	4,7 nF	-
Fotodiodo (BPW34)	D1	-	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones (L x An x Al en mm): 5,4 x 4,3 x 3,2 • Área sensible radiante (en mm²): 7,5 • Ángulo de media sensibilidad: $\varphi = \pm 65^\circ$ • Rango de ancho de banda espectral (nm) = 430 a 1100 • Longitud de onda de sensibilidad máxima (nm) = 900
LED infrarrojo (TSHA4400)	D2	-	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones (en mm): $\varnothing 3$ • Longitud de onda máxima: $\lambda_p = 875$ nm • Ángulo de media intensidad: $\varphi = \pm 20^\circ$
Header (3 pines)	J2, J4	-	• Dimensiones (largo x ancho en mm): 7 x 2
Header (2 pines)	J2	-	• Dimensiones (largo x ancho en mm): 5 x 2
Header (3 pines)	J1	-	• Dimensiones (largo x ancho en mm): 10 x 6.5
Resistencia	R1, R3	1 M Ω	
Resistencia	R2	1.5 k Ω	
Resistencia	R4	100 Ω	
Trimpot	RV1	5k Ω	
Trimpot	RV2	100 k Ω	
Amplificador operacional (TL081)	U1		<ul style="list-style-type: none"> • Alta velocidad de respuesta: 20 V/μs • Baja tensión de compensación: 1 mV • Deriva de tensión de compensación baja: 2 μV/$^\circ$C • Bajo consumo de energía: 940 μA/canal • Amplio modo común y diferencial • Baja polarización de entrada y corrientes de compensación • Ruido bajo: $V_n = 18$ nV/\sqrtHz (típico) a $f = 1$ kHz • Protección de cortocircuito de salida • Distorsión armónica total baja: 0,003% (típico)

Cómo se comentó anteriormente, la razón principal por la que se sustituyó el fotodiodo (SFH 229, OSRAM Licht AG) utilizado en el sensor propuesto en [51], es que la sensibilidad del sensor blando era muy baja. Entonces, al cambiar el fotodiodo por el BPW34 la sensibilidad del sensor aumentó considerablemente debido a que este último tiene un área mayor de incidencia para la luz infrarroja. La figura 57 muestra imágenes del circuito de acondicionamiento terminado.

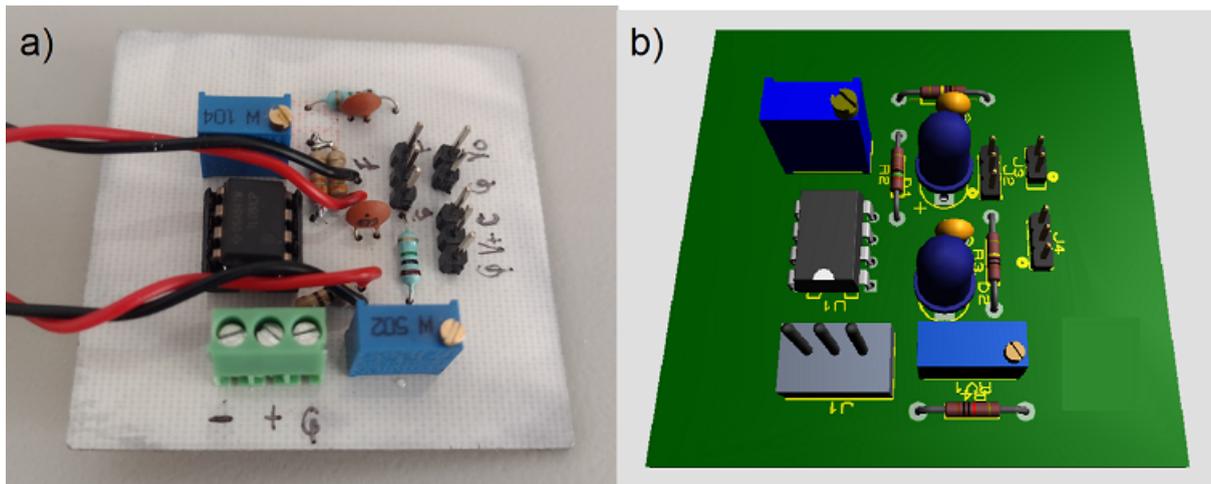


Figura 57. Muestra a) el circuito utilizado para el acondicionamiento de señal, y b) el modelo del circuito

Respecto al circuito utilizado para la digitalización de la señal, se utilizó un circuito prefabricado de *arduino uno*. Este circuito cuenta con un microcontrolador ATmega328p. Dentro de las características principales, es un circuito integrado de alto rendimiento que está basado en un microcontrolador RISC, combinando 32 KB (ISP) flash una memoria con la capacidad de leer-mientras-escribe, 1 KB de memoria EEPROM, 2 KB de SRAM, 23 líneas de E/S de propósito general, 32 registros de proceso general, tres temporizadores flexibles/contadores con modo de comparación, interrupciones internas y externas, programador de modo USART, una interfaz serial orientada a byte de 2 cables, SPI puerto serial, 6-canales 10-bit Conversor A/D (canales en TQFP y QFN/MLF packages), temporizador "watchdog" programable con oscilador interno, y cinco modos de ahorro de energía seleccionables por software. Cuenta además con 6 canales PWM y puede trabajar a una frecuencia máxima de operación de 20 MHz.

A pesar de todas las características con las que cuenta este microcontrolador, para este caso sólo se utilizó el convertidor analógico-digital, para poder medir y transmitir la información entregada por el circuito de acondicionamiento al equipo de cómputo.

El microcontrolador fue programado con una secuencia muy simple. En pocas palabras, la función principal espera a que el equipo de cómputo le envíe la señal para comenzar a leer el voltaje presente en la entrada analógica seleccionada, donde está conectada la salida del circuito de acondicionamiento. Si la señal recibida por el equipo de cómputo es la esperada, el microcontrolador comienza a leer el voltaje en la entrada mencionada y envía el valor digital del convertidor AD por comunicación serial al equipo de cómputo. Cuando el tiempo de medición establecido por el usuario llega a término, el equipo de cómputo manda la señal de paro, el microcontrolador deja de leer y se queda en espera de la señal de inicio.

Es importante mencionar que la frecuencia de muestreo del microcontrolador es de 50 [Hz] y cuenta con una resolución de 1024 bits a 5 [V], es decir, la diferencia mínima de voltaje entre cada bit de resolución está dada cada 0.00488 [V]. La comunicación serial está establecida a 9600 baudios. La figura 58 muestra el diagrama de flujo del programa del microcontrolador.

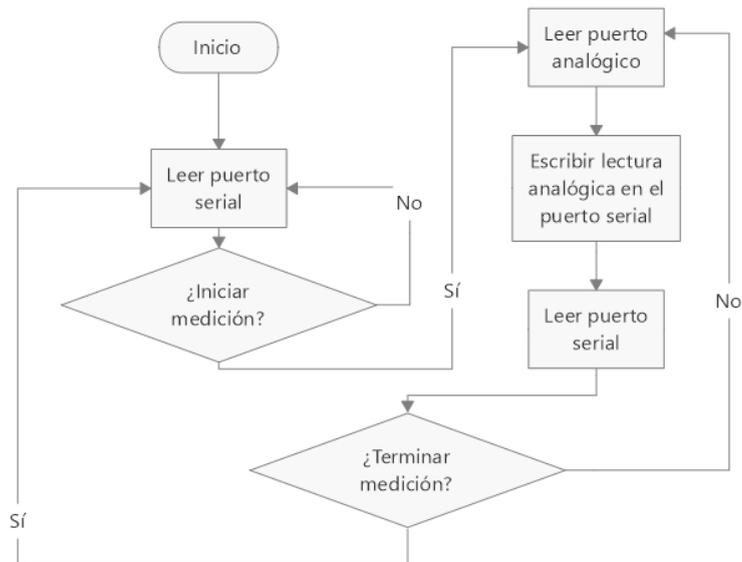


Figura 58. Muestra el diagrama de flujo del programa del microcontrolador.

3.3 Diseño de interfaz de usuario

El objetivo principal de la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) es leer los datos entregados por el microcontrolador, procesar la información, visualizar en tiempo real el estado del sensor, y almacenar la información entregada por el microcontrolador para su posterior análisis e interpretación.

Para lograr el primer objetivo establecido, la interfaz fue programada para que al inicio verifique si existen dispositivos conectados a la computadora y los enliste para su posterior selección por el usuario. Al igual que el microcontrolador, la transmisión serial está establecida a 9600 baudios y tiene una frecuencia de lectura de 100 [Hz].

Respecto al procesamiento de información, se detectó que cuando el microcontrolador entregaba directamente los valores de voltaje correspondientes a los bits del convertidor AD (es decir, si se multiplica valor del convertidor AD por la resolución), el equipo de cómputo tenía en ocasiones errores al interpretar y convertir los valores con punto decimal. Por esta razón el microcontrolador envía directamente el número entero entregado por el convertidor AD, y el equipo hace las operaciones necesarias para convertir estos valores en voltajes y puedan ser procesados.

Para visualizar el estado del sensor en tiempo real, se programó una sección de la aplicación para que funcionara como un osciloscopio con una frecuencia de muestreo de 50 [Hz]. En esta sección la aplicación es capaz de graficar los datos obtenidos por el microcontrolador, convertirlos en voltaje, y compararlos con el tiempo de medición, es decir, se puede visualizar una gráfica de voltaje contra tiempo. Sin embargo, debido a que el comportamiento del sensor es logarítmico, se hicieron las adaptaciones necesarias para que en esta misma sección se pudiera cambiar el sistema de referencia y para procesar la información para visualizar el comportamiento del sensor en esa escala.

Respecto al almacenamiento de información, la aplicación es capaz de exportar los datos obtenidos en el periodo establecido de medición a un archivo de texto. La interfaz fue

programada en el lenguaje de programación C#. La figura 59 muestra imágenes de la aplicación.

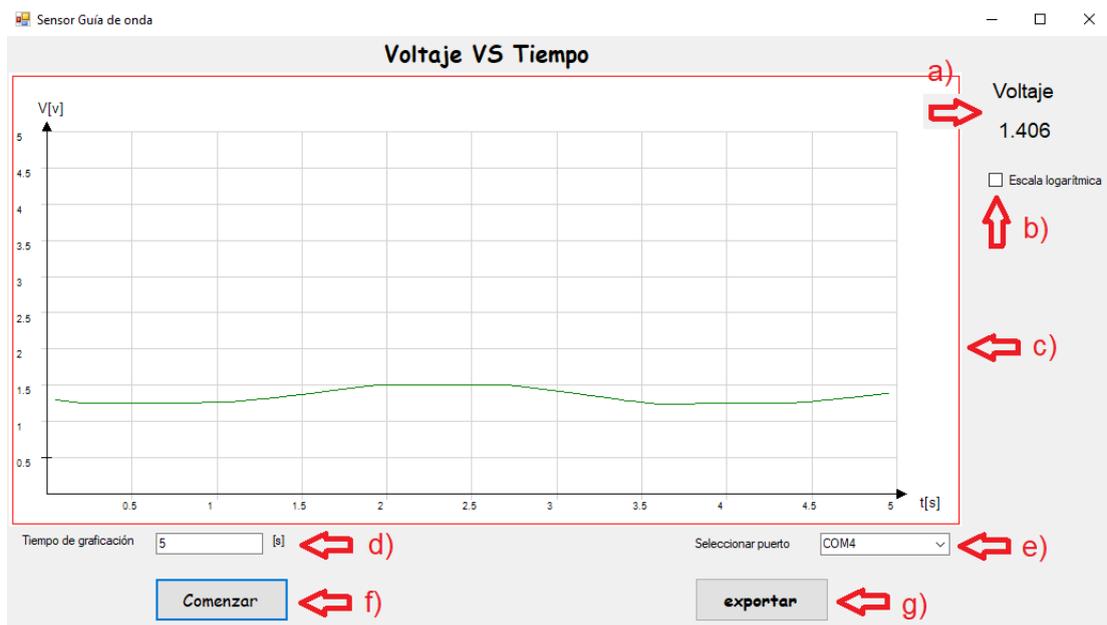


Figura 59. Muestra una imagen de la HMI. a) muestra en tiempo real la información entregada por el microcontrolador, b) cambia el sistema de referencia para que se visualice la gráfica de Ganancia vs tiempo, c) grafica los datos entregados por el microcontrolador en tiempo real, d) muestra el cuadro para establecer el tiempo de medición, e) selecciona el puerto donde se encuentra el microcontrolador, f) muestra el botón que sirve para comenzar o detener el proceso de medición, y g) muestra el botón que sirve para exportar los datos obtenidos en el proceso de medición

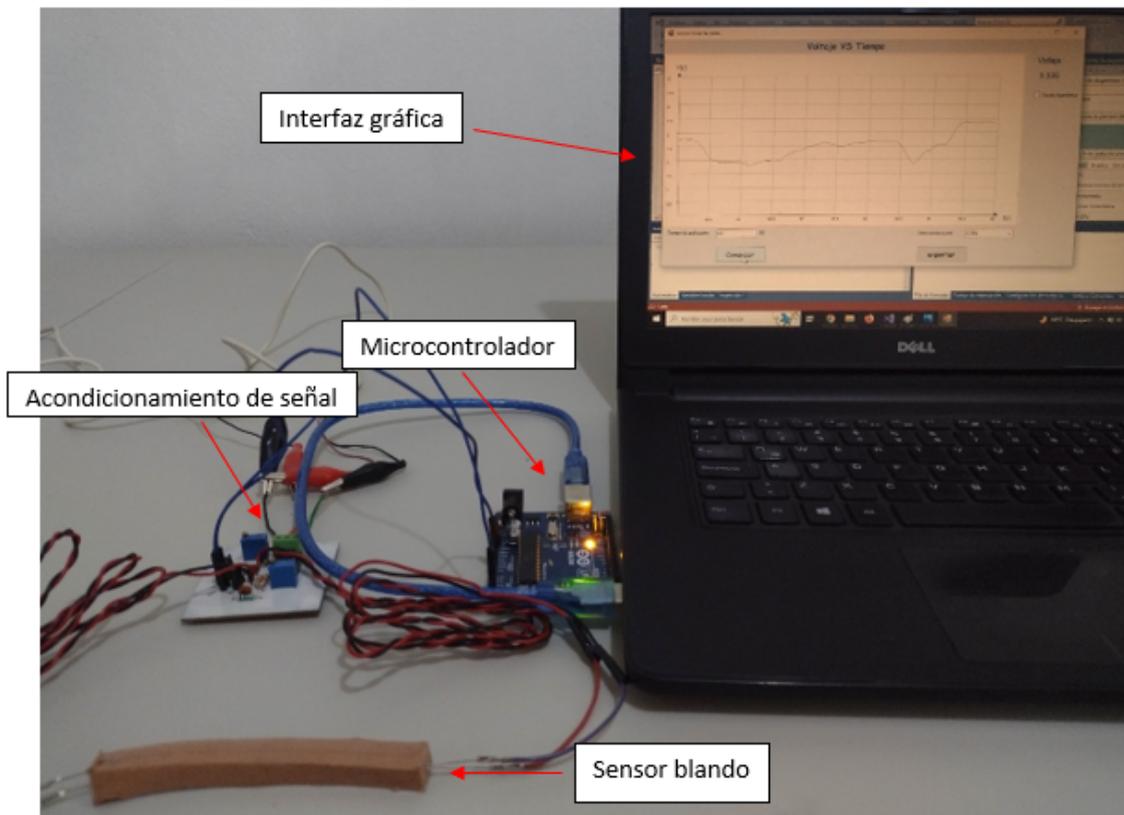


Figura 60. Muestra el sistema de sensado.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

De acuerdo a la información obtenida de [51] y [66], los sensores basados en guía de onda son capaces de detectar cambios en su deformación, curvatura, y en la presión ejercida sobre ellos. Evidentemente, al deformar, curvar y presionar el sensor, se tenía una variación en los valores de voltaje, pero, para que este sensor pudiera ser clasificado como tal, se tenía que garantizar su precisión y correlación con los modelos matemáticos que predicen su comportamiento. Entonces, para poder someter el sensor blando a pruebas bajo condiciones más controladas, se utilizó la máquina de ensayos mecánicos Shimadzu AG-Xplus.

La máquina Shimadzu, es una máquina universal de pruebas mecánicas, la cual cuenta con un control de precisión para el desplazamiento, fuerza, tensión y deformación. Para la operación, esta cuenta con un panel de control manual y un software que permite el control automático de la máquina.

Antes de comenzar a probar el comportamiento de cada sensor, se hicieron pruebas preliminares de compresión, tracción y curvatura en un sensor blando elegido de manera aleatoria. El objetivo de estas pruebas preliminares fueron los siguientes:

Compresión

- Establecer el rango de operación del sensor en función de la fuerza considerando un área constante.
- Establecer la secuencia de fuerzas que se aplicarían al sensor y el tiempo de la prueba.
- Observar el comportamiento del sensor al someterlo a la misma secuencia de fuerzas establecida pero con diferentes áreas.

Tracción

- Diseñar las adaptaciones necesarias que se tendrían que colocar en las piezas de sujeción de la máquina para sostener firmemente el sensor sin afectar su funcionamiento.
- Establecer el rango de operación del sensor en función de la deformación.
- Establecer la secuencia de desplazamientos que se aplicarían al sensor y el tiempo de la prueba.

Curvatura

- Establecer el rango de operación del sensor en función de la deformación.
- Establecer la secuencia de desplazamientos que se aplicarían al sensor y el tiempo de la prueba.
- Verificar el comportamiento de las pérdidas del sensor en función de los índices de refracción de los materiales.

Para realizar el análisis de datos experimentales, debido a que no fue posible conectar el sistema de adquisición de señal del sensor con la máquina de ensayos mecánicos, la adquisición de las lecturas tuvo que ser sincronizada y considerada de forma manual, por lo que el proceso se dividió en tres partes:

1. Filtrado digital, sincronización y adquisición de lecturas.
2. Análisis de dispersión y ajuste lineal.
3. Cálculo de constantes características y error porcentual.

Para este análisis de resultados, es importante aclarar que las probetas que se utilizaron para los ensayos fueron elaboradas siguiendo el mismo procedimiento explicado anteriormente, con la única diferencia de que fueron elaboradas en días diferentes. La razón principal por la que se elaboraron las probetas de esta manera fue para observar si el comportamiento de cada sensor variaba de manera considerable por mínimas variaciones en las concentraciones en la mezcla de las siliconas, en la humedad ambiental o de ensamble. También, los valores de los errores porcentuales se tomaron utilizando los valores de voltaje, ya que, debido a que los primeros valores de ganancia son muy cercanos a cero (o incluso cero), al hacer la relación entre el valor estimado y el valor experimental, los primeros errores porcentuales eran muy grandes. Evidentemente, los valores de error porcentuales serían mayores al no realizar la transformación lineal, sin embargo, estos pueden ser considerados como *límites superiores*, y, posteriormente asignar un intervalo de operación alejado de la ganancia cero para calcular los errores reales.

3.4.1 Compresión

Para establecer los límites entre los valores de presión a los que se podía someter el sensor para tener una respuesta aceptable sin dañarlo, el sensor fue expuesto a una prueba rápida donde se programó a la máquina de ensayos mecánicos para que se desplazara a una velocidad constante. El área transversal utilizada como referencia fue la de una pieza circular perteneciente al ensamble de la máquina, la cual tenía un área de 78.5 [mm²]. Se registraron los valores de fuerza y de voltaje entregados por la máquina y el sensor relativamente. El valor de fuerza correspondiente a un voltaje de 1 [v] en el sensor fue aproximadamente de 4 [N]. Con esta información se establecieron las condiciones con las que se iban a realizar los demás ensayos preliminares de compresión, los cuales tendrían un paso de 0.25 [N] hasta llegar a 4 [N].

Cabe mencionar que el sensor fue calibrado para que en estado de reposo entregara un voltaje de aproximadamente 4.3 [v], ya que si se utilizara el voltaje máximo del AD, no se sabría si el sensor está en saturación, y, por lo tanto, se perdería información. Los valores iniciales de voltaje del sensor pueden variar, pero el sensor tendrá el mismo comportamiento si interpretamos los datos en función de la ganancia y no sólo con el voltaje.

Para establecer el tiempo que se tenía que sostener la carga sobre el sensor, se observó y midió el tiempo que se tardaba en estabilizar el valor de voltaje después de que había un cambio en la fuerza aplicada. La respuesta del sensor fue rápida y la parte transitoria era casi imperceptible para pequeños cambios de fuerza, sin embargo, para poder hacer más

evidente el cambio de fuerza y su correlación con los valores de voltaje, se programó la máquina para que después de alcanzar el valor de fuerza deseado, mantuviera la carga por 4 segundos.

Por último, para establecer el límite entre las áreas que se utilizarían para evaluar la respuesta del sensor, se repitieron las secuencias de carga ya establecidas, pero se utilizaron adicionalmente dos valores de área diferentes, las cuales eran mayores a la utilizada anteriormente. En total se utilizaron tres valores de áreas: 78.5, 100, 280 [mm²]. Después de repetir la secuencia de fuerzas tres veces para cada área, se observó que la respuesta del sensor para el área mayor era muy débil, debido a que la fuerza ejercida se estaba distribuyendo en una área mayor, por lo cual se estableció que las áreas con las que se iban a realizar las siguientes pruebas con los demás sensores serían 110, 160 y 210 [mm²].

Las figuras 61 y 62 muestran los datos obtenidos en las pruebas preliminares.

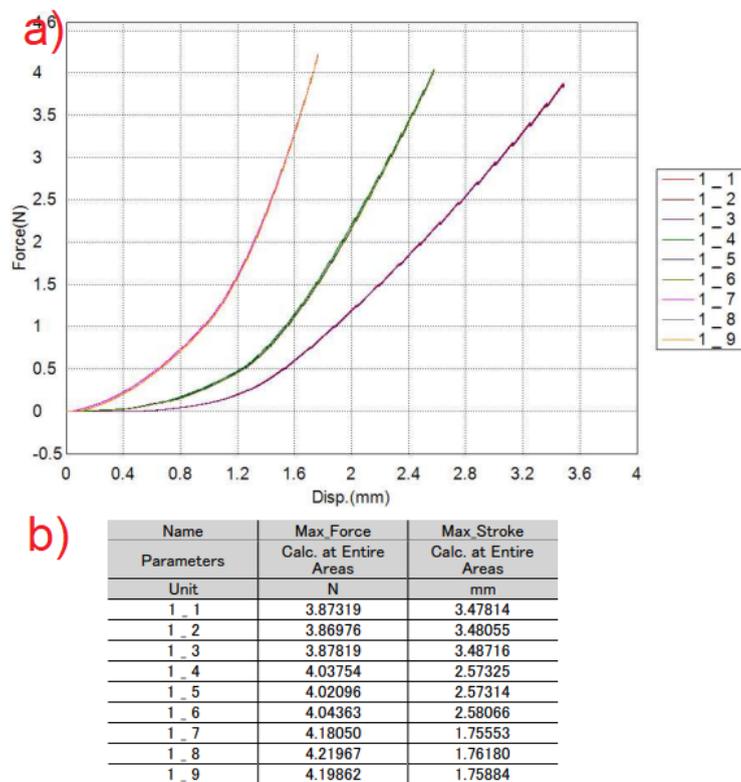


Figura 61. a) Muestra las gráficas de fuerza contra desplazamiento para las 9 pruebas que se le realizaron al sensor. b) Muestra la fuerza máxima y el desplazamiento máximo de cada prueba

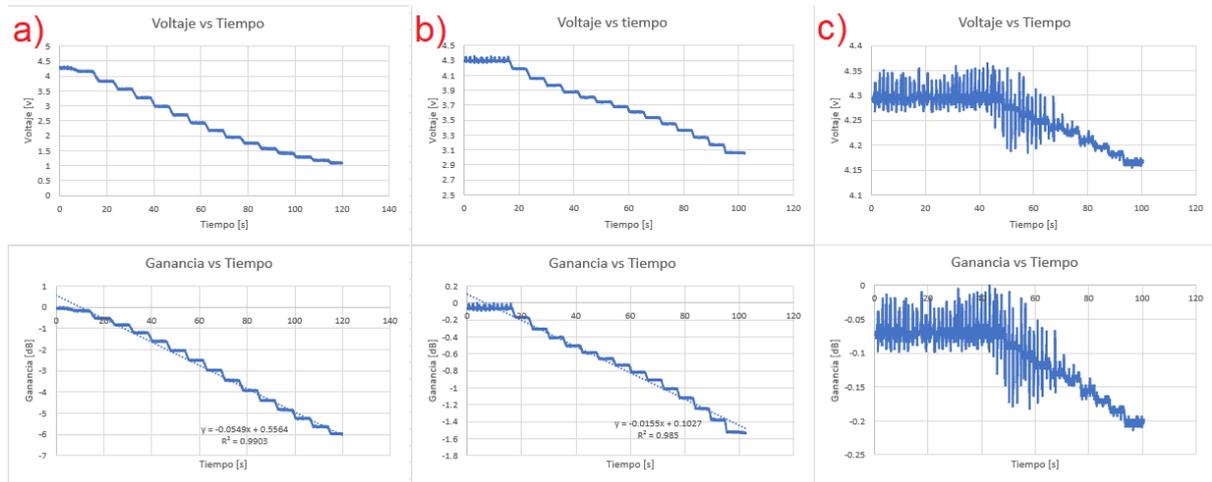


Figura 62. Muestra las gráficas del voltaje entregado por el sensor al ser sometido a la misma secuencia de fuerza pero modificando el área. a) corresponde al área 78.5 [mm²], b) corresponde a 100 [mm²], y c) corresponde a 280 [mm²]. (Ninguna de las gráficas fue sometida a un filtro digital)

Cómo se puede ver en la figura 62, la relación que existe entre la presión ejercida en el sensor y la ganancia es prácticamente lineal, sin embargo, se detectó que el área que se estaba utilizando para ejercer presión sobre la probeta también influye en la forma en la que se deforma el área transversal, y, por lo tanto en la respuesta del sensor.

Comparando los resultados obtenidos con los artículos de investigación encontrados, se comprobó que en estos también hubo una respuesta inesperada en las pendientes de las curvas de tendencia (o directamente en la linealidad) de la respuesta, la cual no fue justificada, ya que la respuesta del sensor a este tipo de estímulo reportada en [51], es basada en la suposición de que el sensor se deforma longitudinalmente de forma local en la sección transversal donde se está ejerciendo la presión, sin embargo, también se puede considerar que existen cambios de curvatura locales en las secciones transversales más pequeñas, lo cual podría justificar los cambios en la respuesta del sensor.

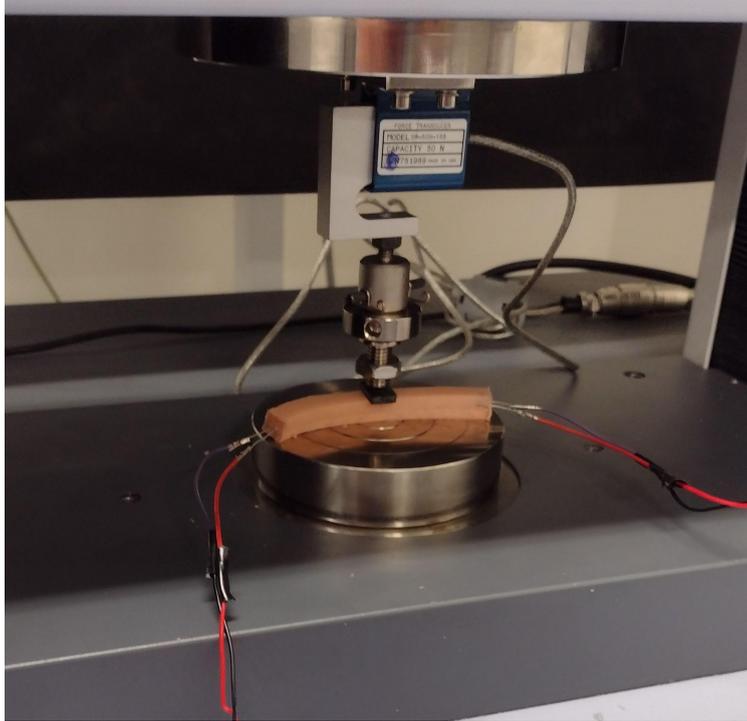


Figura 63. Muestra la imagen de uno de los sensores sometidos al ensayo de compresión.

Entonces, el intervalo máximo de fuerza que se estableció para realizar el ensayo fue de 4 [N], y este se dividió en 16 pasos, lo que nos da un valor de fuerza para cada paso de 0.25 [N]. Para validar el comportamiento del sensor se realizaron tres secuencias para cada valor de área, lo que nos da en total 27 secuencias para la prueba de compresión. A continuación se muestran los datos experimentales obtenidos por el primer sensor. La información correspondiente a las demás áreas y sensores que se evaluaron para validar el comportamiento del sensor, puede ser encontrada en el anexo 1. La integración de las curvas correspondientes a su comportamiento se presentarán de forma resumida.

SENSOR 1

Área 110 mm²

Como se puede observar en la figura 64, los datos obtenidos por el sensor para el área de 110 mm² son claramente diferenciables, por lo cual no se tuvo que aplicar un proceso de filtrado para quitar algún tipo de ruido ambiental.

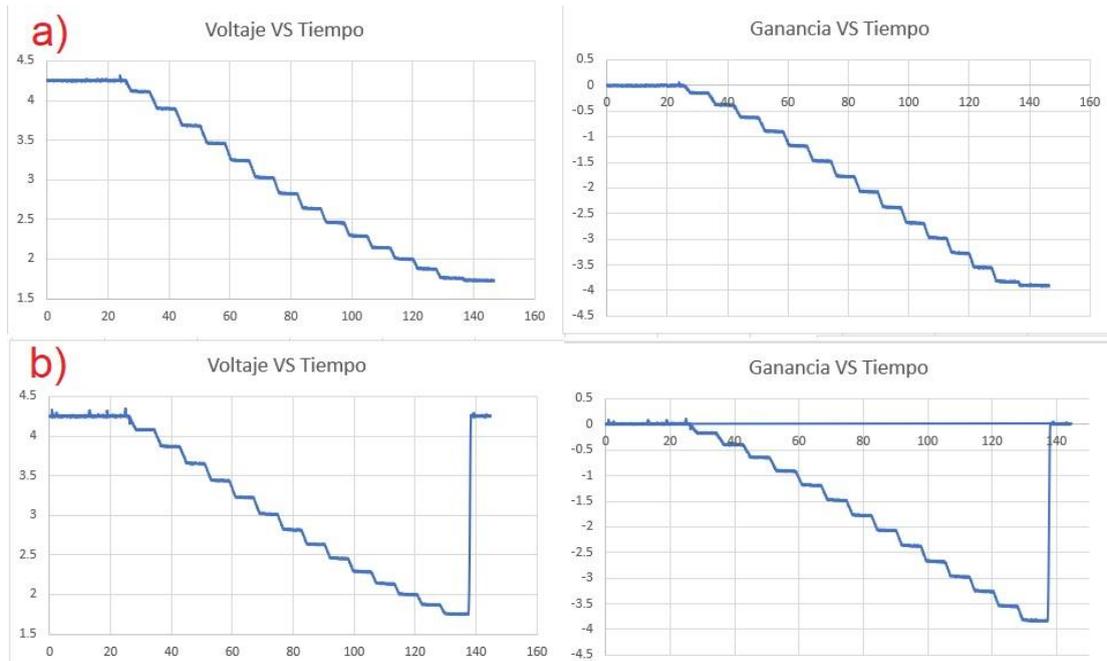


Figura 64. Muestra las gráficas de los datos obtenidos por el sensor al realizar el ensayo de compresión con un área de 110 mm². a) muestra las gráficas obtenidas para el ensayo 1, mientras que b) muestra el segundo ensayo.

Al comparar la respuesta del sensor en cada uno de los ensayos con el área de 110 [mm], se pudo observar que hubo un ligero desfase de las respuestas, sin embargo, las respuestas de todos los sensores fueron similares, lo que nos indica que esta variación pudo haber sido causada por una variación en la luz ambiental o en la posición del sensor. La figura 65 muestra gráficamente la comparación entre las lecturas.

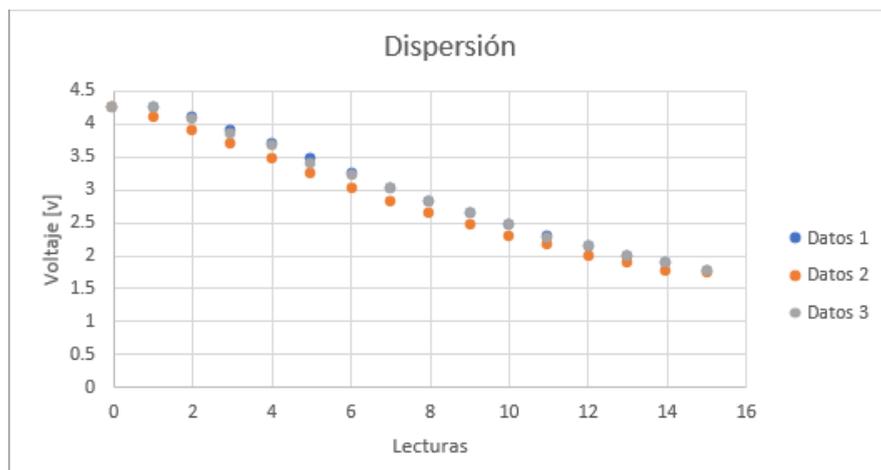


Figura 65. Muestra la comparación entre las lecturas obtenidas en los tres diferentes ensayos del primer sensor con un área de 110 [mm²]

Para hacer el ajuste lineal de las lecturas obtenidas, se hizo un promedio de las lecturas obtenidas en cada ensayo. Debido a que al calcular los errores porcentuales y graficarlos se lograba apreciar una tendencia que podía ser mejorada con un ajuste de un polinomio de tercer grado, se realizaron los dos tipos de ajuste, el de un polinomio de primer grado y el

de tercer grado. Los coeficientes de determinación para el ajuste de primer y tercer grado fueron del 0.9915 y 0.999 respectivamente. La figura 66 muestra la línea de tendencia entre las lecturas y la respuesta del sensor

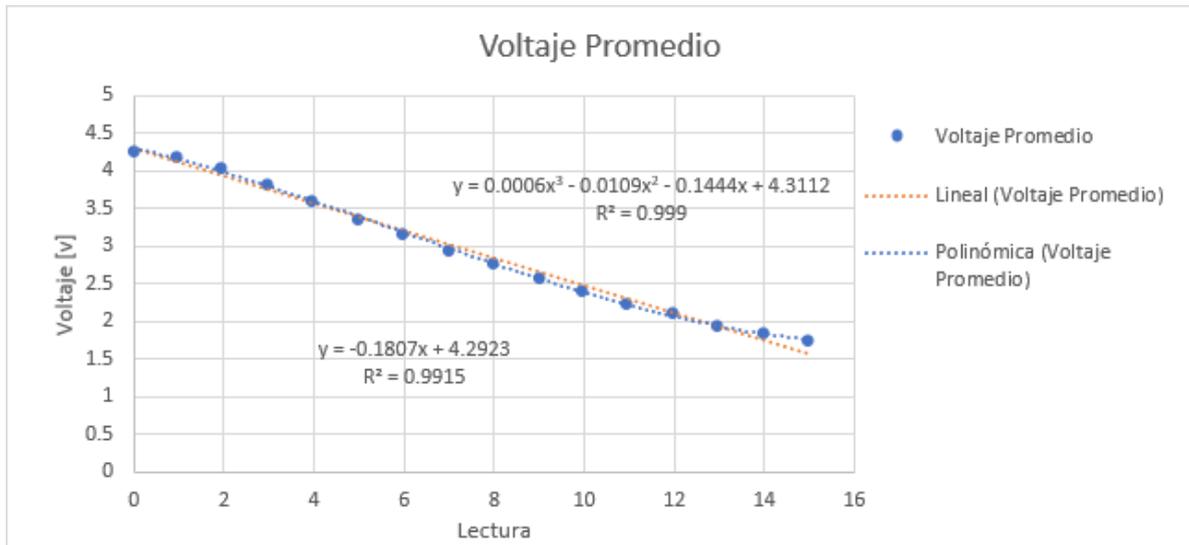


Figura 66. Muestra las líneas de tendencia de la gráfica de voltaje vs lectura.

Para hacer el cálculo de las constantes características del sensor, se tomó en consideración para la respuesta del sensor, que, cuando este se comprimía, se generaba una expansión longitudinal local en el sensor [51], sin embargo, esta consideración podría estar incompleta, ya que al observar la diferencia en el comportamiento del sensor, al cambiar el área, se podría considerar que también se pueden estar teniendo pérdidas por curvatura local. Habiendo dicho esto, nos centraremos únicamente en calcular la relación encontrada entre la presión ejercida en el sensor y la respuesta del mismo, sin comparar con un modelo teórico establecido. Por lo tanto, para caracterizar el sensor se tomaron en cuenta los valores de fuerza registrados por el equipo de ensayos mecánicos, el área donde se estaba ejerciendo la fuerza, y la ganancia que presentó el sensor. La figura 67 muestra la gráfica de Ganancia vs Presión.

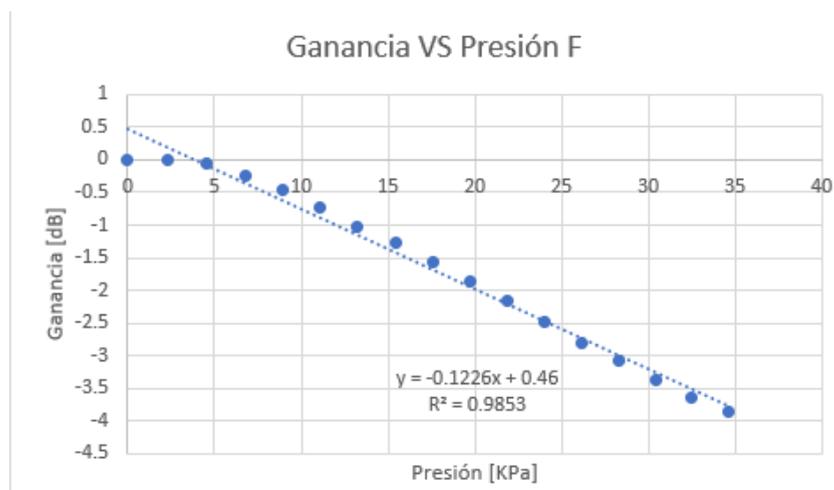


Figura 67. Muestra la gráfica de Ganancia vs Presión y su línea de tendencia.

Como se puede ver en la figura 67, el sensor no presenta ninguna respuesta antes de 5 [KPa]. Este comportamiento se repitió de forma similar en los demás sensores con diferentes áreas, por lo que se propuso que el rango de operación del sensor podría ser considerado a partir de 5 [KPa]. La figura 68 muestra el ajuste lineal que se obtiene al considerar que el rango de operación es mayor a 5 [KPa].

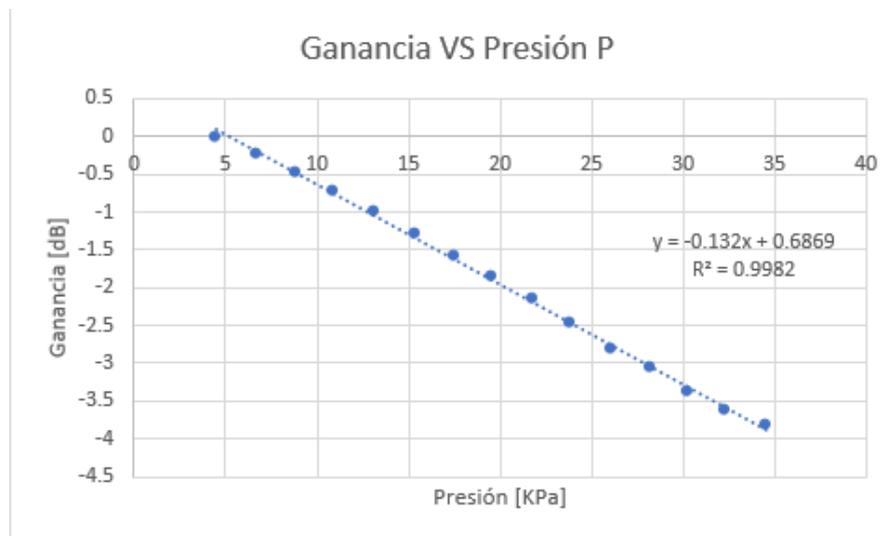


Figura 68. Muestra la gráfica de Ganancia VS Presión y la línea de tendencia si se considera que el rango de operación del sensor es mayor a 5 [KPa]

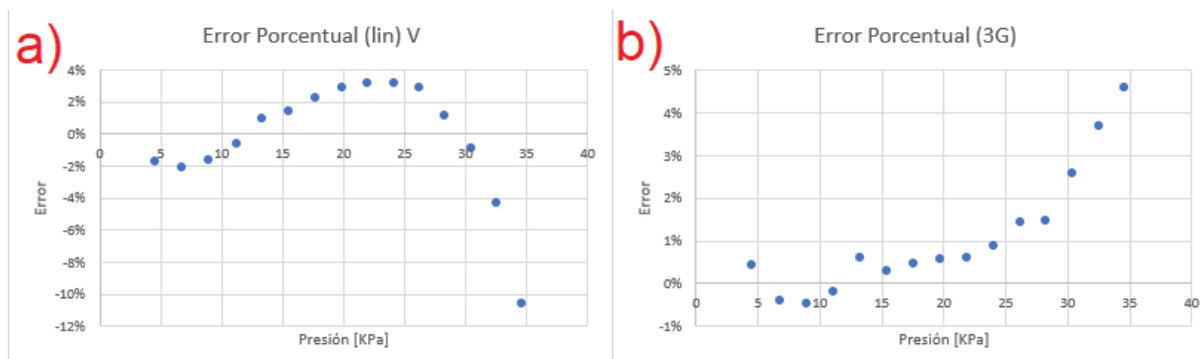


Figura 69. Muestra los errores porcentuales tomando como referencia las líneas de tendencia. a) Muestra los errores porcentuales de la tendencia lineal, mientras que b) muestra los errores porcentuales del polinomio de tercer grado.

Como se puede ver en la figura 69a y 69b el error porcentual del ajuste lineal oscila aproximadamente entre el 3% y el -11%, mientras que el error porcentual del ajuste del polinomio de tercer grado oscila aproximadamente entre el -0.5% y el 5%, por lo que claramente se tendrían mejores aproximaciones si se utiliza en ajuste de tercer grado.

Por lo tanto, con base a las evidencias, se consideró que el sensor tiene un comportamiento lineal de la forma $y = ax + b$ donde "a" tiene un valor de $a = -0.132$ [dB/KPa], y "b" un valor de $b = 0.6869$ [dB].

3.4.2 Tracción

Para realizar las pruebas preliminares de tracción, se tuvieron que diseñar algunas piezas, ya que la máquina de ensayos mecánicos no era capaz de sujetar el sensor correctamente sin dañarlo. Haciendo pruebas, se observó que al colocar el sensor en el elemento de sujeción con el que se realizan los ensayos de tracción, se tenía que ejercer algo de presión en el sensor para que no existiera deslizamiento, sin embargo, esta presión era detectada por el sensor. Para disminuir la presión ejercida por el elemento de sujeción, minimizar el deslizamiento y evitar que se los componentes auxiliares del sensor se dañaran, se diseñó una base la cual tenía la forma del sensor. La figura 70 muestra el modelo del sujetador del sensor.

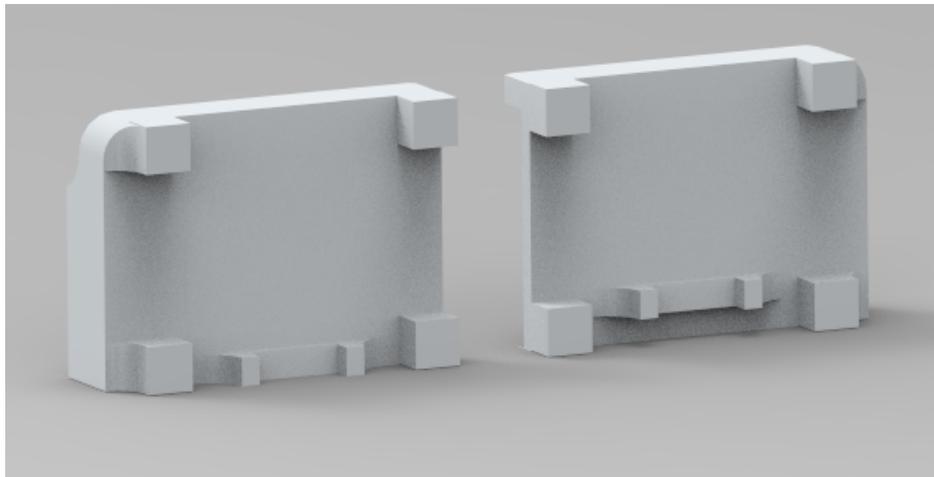


Figura 70. Muestra el modelo del sujetador del sensor.

Como se puede ver en la figura 70, los sujetadores se diseñaron de manera simétrica y las partes que estaban en contacto con el sensor se hicieron para que quedaran una sobre la otra, para que la probeta adoptara la forma de “zig zag”, ya que después de iterar el diseño varias veces se llegó a la conclusión de que esta era la configuración en que se evitaba el deslizamiento sin que el sensor fuera presionado con tanta fuerza.

Para establecer las condiciones iniciales, los intervalos y el desplazamiento máximo que iba a tener el sensor, primero se hicieron pruebas de tracción sólo con los sujetadores para evaluar cuál era el desplazamiento máximo que se podía tener antes de que ésta se deslizara. Se tomó en cuenta este parámetro porque el deslizamiento llegaba mucho antes de que la probeta empezara a romperse, y, como se comentó anteriormente, si se aplicaba más presión sobre la probeta, la respuesta del sensor empezaba a disminuir considerablemente. Con la pruebas de sujeción también se determinó la distancia a la que tenía que colocarse el sensor en los sujetadores para que no dañara los componentes auxiliares. Los sujetadores se colocaron a 1 [cm] de los extremos de la probeta, y, por lo tanto, quedaron 7 [cm] libres para realizar el ensayo de tracción. La distancia máxima que se podía estirar el sensor antes de que comenzara a deslizarse fue de aproximadamente 4 [cm], sin embargo, para no acercarnos demasiado a esta distancia y no dañar los sensores por el deslizamiento, se estableció que se tendría una distancia máxima de 2 [cm]. El intervalo de 2 [cm] se dividió en 10 para obtener un paso de 0.2 [cm] entre cada lectura.

Al comprobar la respuesta del sensor utilizando estos parámetros iniciales y los intervalos de desplazamiento, se obtuvo una muy buena respuesta, la cual fue lineal en la comparación de ganancia contra lectura, y se ajustaba al modelo teórico de Beer-Lambert. La figura 71 muestra las gráficas voltaje y ganancia de las pruebas preliminares.

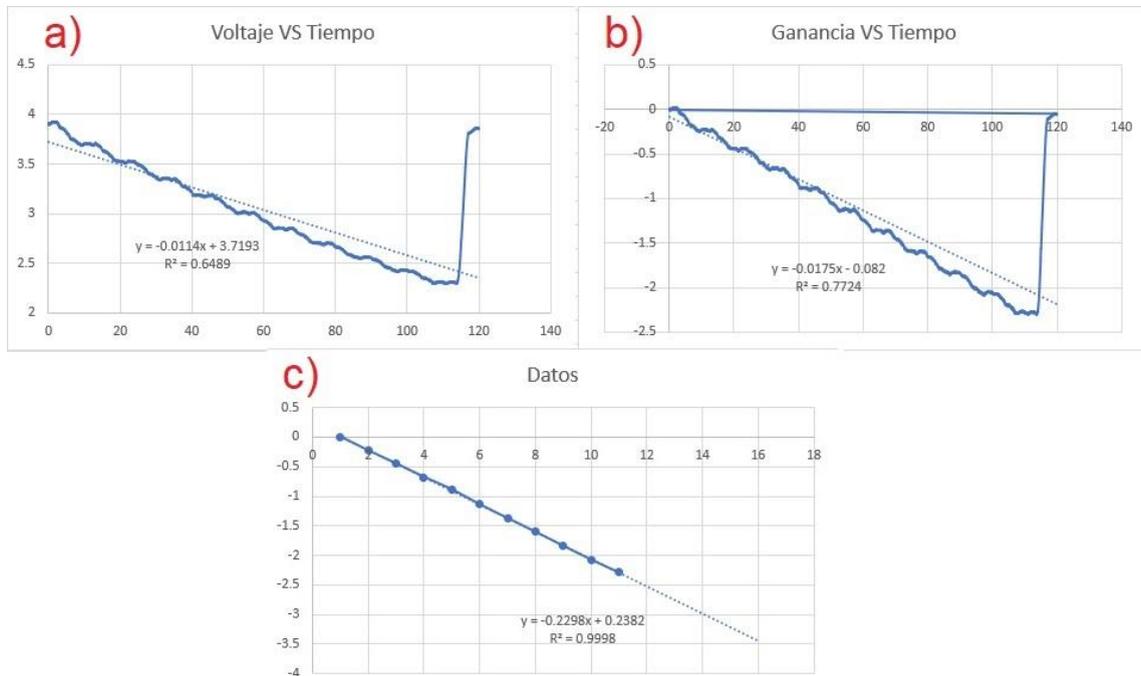


Figura 71. Muestra las gráficas obtenidas de las pruebas preliminares. a) Muestra la respuesta del sensor en Voltaje vs Tiempo, b) muestra la gráfica de Ganancia vs Tiempo, c) muestra la gráfica de Ganancia vs Lectura. (Nota: la respuesta de la última parte de las gráficas corresponde al regreso a la posición inicial de la máquina de ensayos mecánicos)

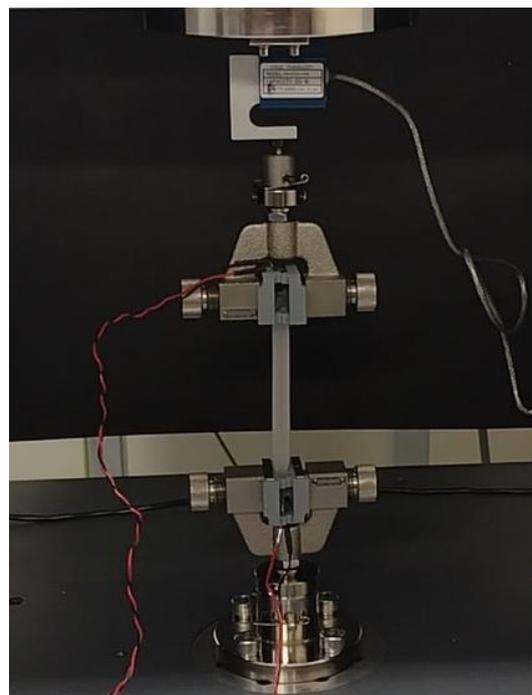


Figura 72. Muestra una probeta sometida al ensayo de tracción.

Entonces, para garantizar la reproducibilidad de la respuesta a los ensayos de tracción, se realizaron 3 ensayos para cada sensor. Para que no existiera algún deslizamiento en el sensor, se estableció que la distancia máxima de desplazamiento del sensor sería de 20 [mm], y este intervalo se dividió en 10 pasos para obtener así un desplazamiento de 2 [mm] por lectura. La longitud (o separación entre extremos) inicial del sensor fue de 70 [mm]. A continuación se muestra la información obtenida al evaluar el primer sensor. La información correspondiente a los demás sensores que se evaluaron para validar el comportamiento del sensor, puede ser encontrada en el anexo 2.

SENSOR 1

Para las pruebas de tracción del primer sensor, la respuesta presentó ruido ambiental (El cual se puede apreciar como pequeñas oscilaciones al principio del ensayo), y un posible “deslizamiento” o perturbación de uno de los componentes auxiliares, la cual se ve como un desfase, poco antes de terminar con el ensayo. El ruido ambiental que aparece al principio del primer ensayo fue filtrado digitalmente, sin embargo, este ruido ya no apareció en los ensayos 2 y 3. Respecto a el posible deslizamiento del sensor al final del ensayo, este apareció durante los tres ensayos. La figura 73 muestra la respuesta del sensor para cada uno de los ensayos.

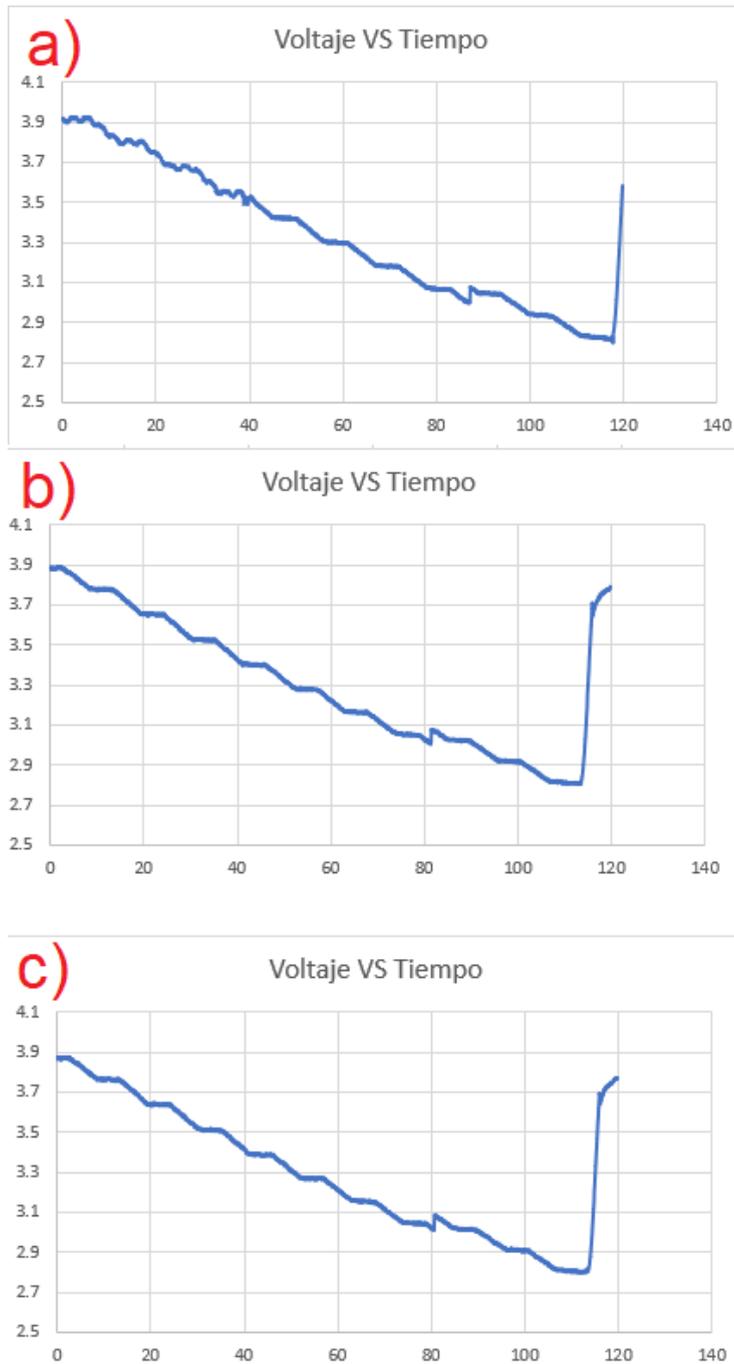


Figura 73. Muestra la respuesta en voltaje del sensor 1 para cada uno de los ensayos. a), b) y c) muestran el primer, segundo y tercer ensayo respectivamente.

Al comparar la respuesta del sensor con cada uno de los ensayos, podemos observar que estas coinciden casi perfectamente entre sí, por lo que podemos decir que el comportamiento del sensor es reproducible. La figura 74 muestra las lecturas obtenidas en cada ensayo de tracción del primer sensor.

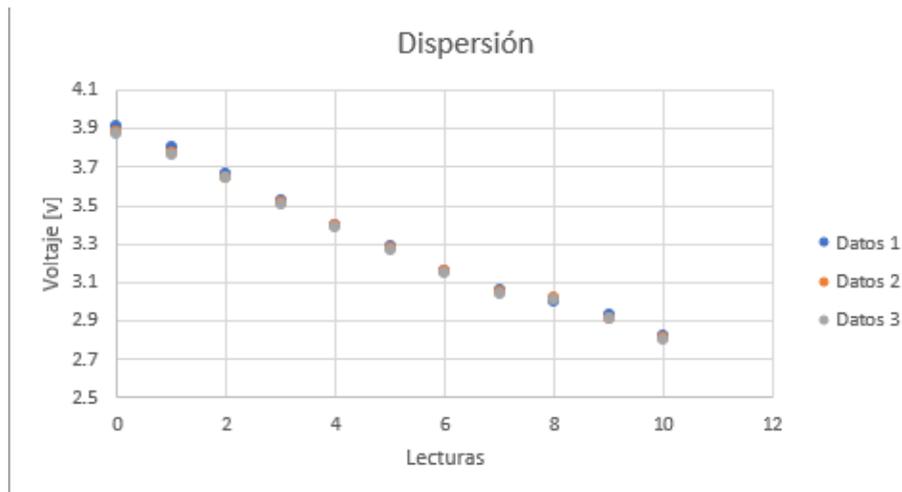


Figura 74. Muestra la comparación entre las lecturas obtenidas en los tres diferentes ensayos del primer sensor

Al igual que como se hizo en el ensayo de compresión, los datos obtenidos de cada uno de los ensayos fueron promediados en cada lectura y después se graficaron para poder calcular dos líneas de tendencia: una lineal y una polinómica de tercer grado. La figura 75 muestra la gráfica de los valores promedio vs lecturas y las líneas de tendencia.

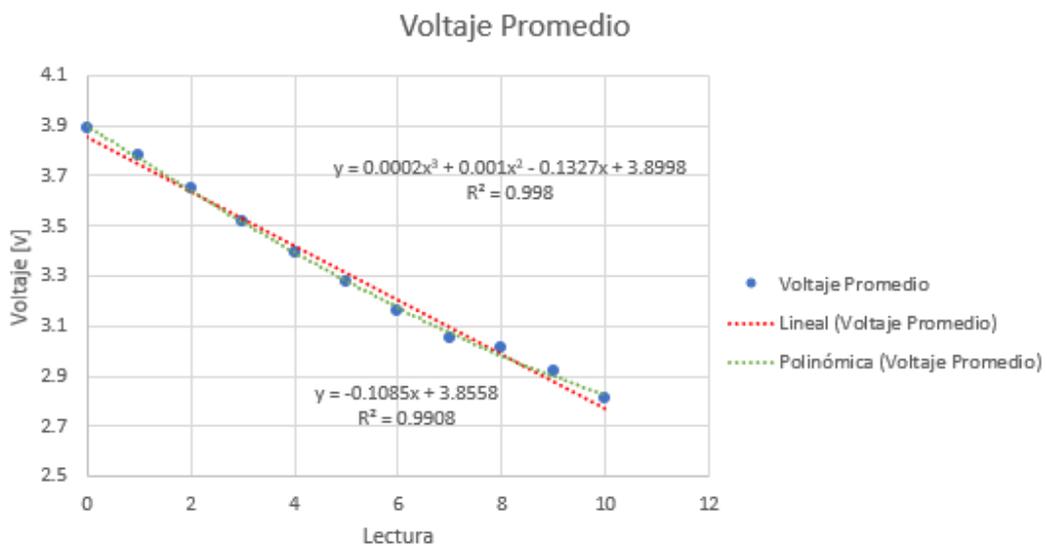


Figura 75. Muestra las líneas de tendencia de la gráfica de voltaje vs lectura.

Para hacer el cálculo de las constantes características del sensor y comparar el comportamiento con un modelo teórico, se tomó como base el principio de Beer - Lambert. Como se comentó anteriormente, el principio de Beer - Lambert relaciona la absorción de intensidad luminosa (absorbancia) al pasar a través de un medio, con la absorción del material, la concentración de especies absorbentes y la longitud del haz luminoso en el medio absorbente.

$$A = -\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) = \epsilon Cl$$

Observando la ecuación anterior y haciendo algunas consideraciones, podemos relacionar directamente los valores de desplazamiento realizados en el ensayo de tracción con la respuesta en ganancia del sensor. La primera consideración para obtener nuestro modelo es que la intensidad luminosa inicial a la que se hace referencia será considerada como la intensidad luminosa que logra ser detectada por el sensor sin deformación, es decir, a 70 [mm]. Esta consideración es importante porque podemos decir que la absorbancia para el sensor sin deformación es igual a cero y el valor de la longitud del haz puede ser considerada de forma directa, ya que al igual que la absorbancia, el valor de "L" sería igual a cero. La segunda consideración es que, de acuerdo a la hoja de especificaciones del fotodiodo utilizado, el valor de corriente que pasa a través del fotodiodo es directamente proporcional al valor de Lux [Lm/m²] al que se está exponiendo el sensor. Dentro de la hoja de especificaciones este valor tienen las dimensiones de [nA/Lx] (nano Amperes sobre lux), y tiene un valor que puede estar entre los 50 y 80 [nA/Lx], sin embargo, no fue necesario calcular este valor, ya que al hacer el cociente entre el valor de intensidad luminosa inicial y la actual, las constantes dimensionales se eliminan. Por lo tanto, el cociente entre la cantidad de intensidad luminosa inicial y actual es igual al cociente entre el voltaje inicial y actual entregado por el sensor, lo que fácilmente podemos poner en función de la ganancia. Aplicando estas consideraciones a la relación de Beer - Lambert, podemos llegar a la siguiente expresión:

$$A = \log_{10}\left(\frac{V_0}{V}\right) = \epsilon Cl \Rightarrow A = \frac{G}{10} = \epsilon Cl$$

O bien:

$$G = 10\epsilon Cl$$

Si agrupamos el valor de las constantes en una sola llamada "a" de la siguiente manera "a = 10εC" y sumamos una constante "b" a la expresión, la cual corresponde a un valor de absorbancia de referencia, obtenemos la siguiente expresión:

$$\therefore G = al + b$$

Donde "G" es el valor de ganancia en decibeles y "l" es el valor de desplazamiento.

Estableciendo la expresión matemática anterior como referencia, se analizaron los datos y se comprobó que el sensor 1 se acercaba mucho a este comportamiento. La figura 76 muestra gráficamente los datos obtenidos por el sensor después de realizar la prueba de tracción, mientras que la figura 80 muestra los errores porcentuales respecto a las líneas de tendencia.

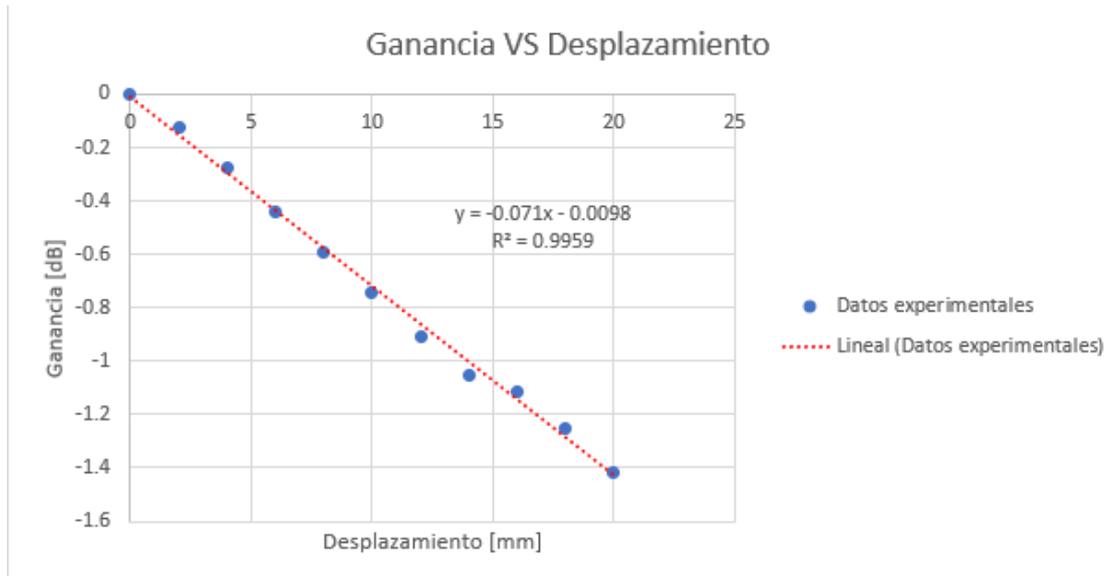


Figura 76. Muestra la gráfica de Ganancia vs Desplazamiento y su línea de tendencia.

Para este sensor, como se puede ver en la figura 76, las constantes características son **a = -0.071 [dB/mm]** y **b = -0.0098 [dB]**

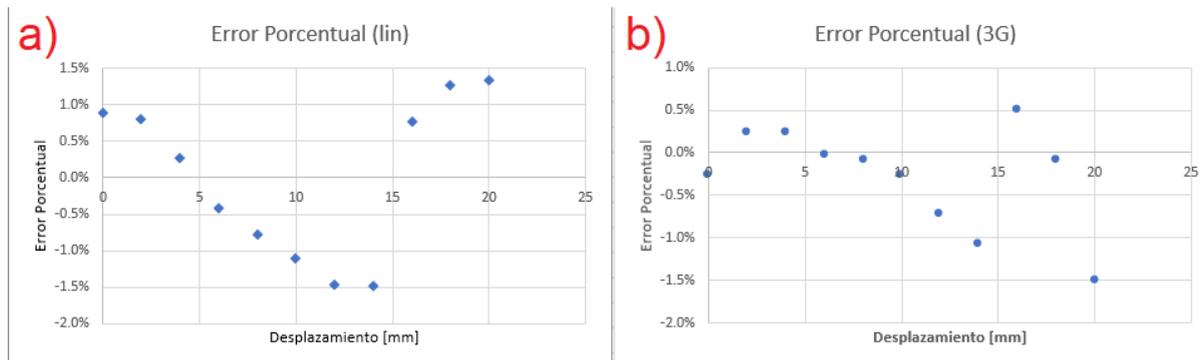


Figura 77. Muestra los errores porcentuales tomando como referencia las líneas de tendencia. a) Muestra los errores porcentuales de la tendencia lineal, mientras que b) muestra los errores porcentuales del polinomio de tercer grado.

A pesar de que la respuesta de sensor tuvo un pequeño desfase al final del ensayo, este tuvo un comportamiento muy lineal, ya que, como se puede ver en la figura 76, el coeficiente de determinación fue de $R^2 = 0.9959$, y los errores respecto a la línea de tendencia lineal oscilaron entre el -1.5% y el 1.5%, como se puede ver en la figura 77a.

Al observar el comportamiento de los tres sensores, podemos apreciar que los tres tienen constantes características diferentes, sin embargo, a pesar de que el segundo sensor presentó un comportamiento un poco alejado de la respuesta proporcional, los tres sensores se ajustaron casi perfectamente al modelo teórico.

3.4.3 Curvatura

Para realizar las pruebas preliminares para el ensayo de curvatura, se tomaron en consideración los parámetros obtenidos del ensayo de tracción, ya que prácticamente tenía que tener la misma configuración inicial, pero después, en vez de aumentar la distancia entre los extremos de la guía de onda, esta se tenía que reducir. Por lo tanto, la distancia inicial entre los extremos del sensor fue de 7 [cm], la distancia de recorrido del ensayo fue de 2 [cm] y esta fue dividida en 10 intervalos. Ya definidos estos parámetros, los extremos de la probeta se acercaron entre sí y la curvatura del sensor se dejó que se ajustara de forma natural.

Es importante señalar que para hacer esta prueba se tuvieron que hacer algunas consideraciones para facilitar los cálculos y procurar que la prueba se realizara con la menor influencia externa, ya que los sensores presentaban respuestas a la luz ambiental y una mínima sombra generaba un cambio en la respuesta. Para calcular la curvatura se hicieron las siguientes consideraciones:

1. El punto máximo de la curva se generaba exactamente a la mitad de la distancia entre los extremos, es decir, para la posición inicial, la distancia sería 3.5 [cm], y para la posición final, la distancia sería de 2.5 [cm], e igualmente con los puntos intermedios..
2. La distancia entre un extremo y el punto máximo de la curva es aproximadamente constante, es decir, siempre mediría 3.5 [cm].

Con estas dos consideraciones podemos hacer relaciones geométricas para aproximar el valor de curvatura que estaba experimentando la probeta durante el ensayo. A continuación, apoyándonos en la figura 78, se explican las relaciones geométricas que se utilizaron para el cálculo de curvatura:

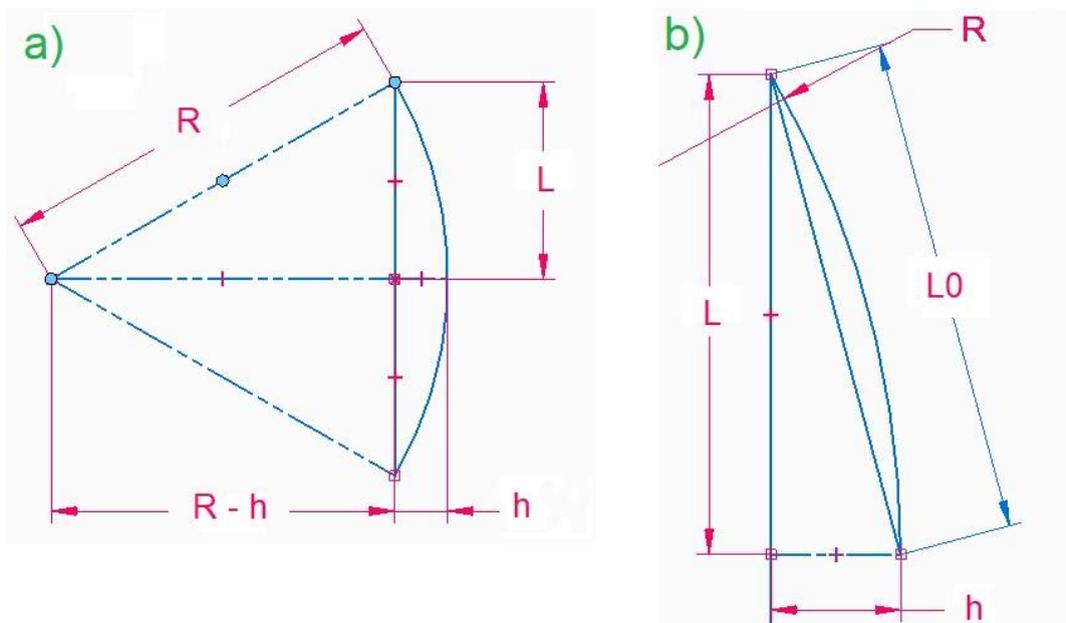


Figura 78. Muestra las geometrías que se tomaron en cuenta para aproximar la curvatura del sensor blando. a) Representa el radio de curvatura del sensor (R) y las variables necesarias para calcularlo (L y h). b) Muestra un acercamiento a la parte superior de la imagen a)

Como se puede ver en la figura 78a, la forma de la probeta está representada por medio de la sección circular. A partir del punto medio de la circunferencia que forma el sensor y los extremos del mismo, podemos formar dos triángulos rectángulos que tienen como valor de hipotenusa, cateto opuesto y cateto adyacente; “L₀”, “h” y “L” respectivamente. Recordando la configuración de la probeta para el ensayo de curvatura, nos podemos dar cuenta de que el valor de “h” no puede ser medido directamente, pero puede ser aproximado tomando en cuenta las dos consideraciones antes mencionadas. Por lo tanto, como se muestra en la figura 78b, el valor de “h” puede ser calculado utilizando el teorema de pitágoras:

$$h = \sqrt{(L_0)^2 - (L)^2}$$

Conociendo ya el valor de “h” y prestando atención a la figura 78a, nos podemos dar cuenta de que el radio de curvatura está relacionado con las variables “L” y “h” igualmente por el teorema de pitágoras:

$$R^2 = (R - h)^2 + (L)^2$$

Desarrollando la expresión y simplificando obtenemos la siguiente expresión:

$$R^2 = R^2 - 2Rh + h^2 + L^2$$

$$2Rh = h^2 + L^2$$

$$R = \frac{h^2 + L^2}{2h}$$

Por lo tanto, el valor de curvatura es igual al inverso del radio de curvatura.

$$\therefore \kappa = \frac{1}{R} = \frac{2h}{h^2 + L^2}$$

Ya que se establecieron las condiciones para realizar el experimento, la probeta fue sometida al ensayo de curvatura. La respuesta del sensor a este tipo de ensayo fue diferente a las dos pruebas anteriores, ya que claramente la respuesta era no lineal. Sin embargo, al investigar sobre este tipo de respuesta, comparar con otros artículos y analizar su comportamiento teórico en base a la ley de snell, nos dimos cuenta de que la respuesta coincidía con el comportamiento esperado, el cual tenía que coincidir con un modelo de

pérdidas exponenciales en función del radio de curvatura. Las gráficas del comportamiento del sensor son presentadas en la figura 79.

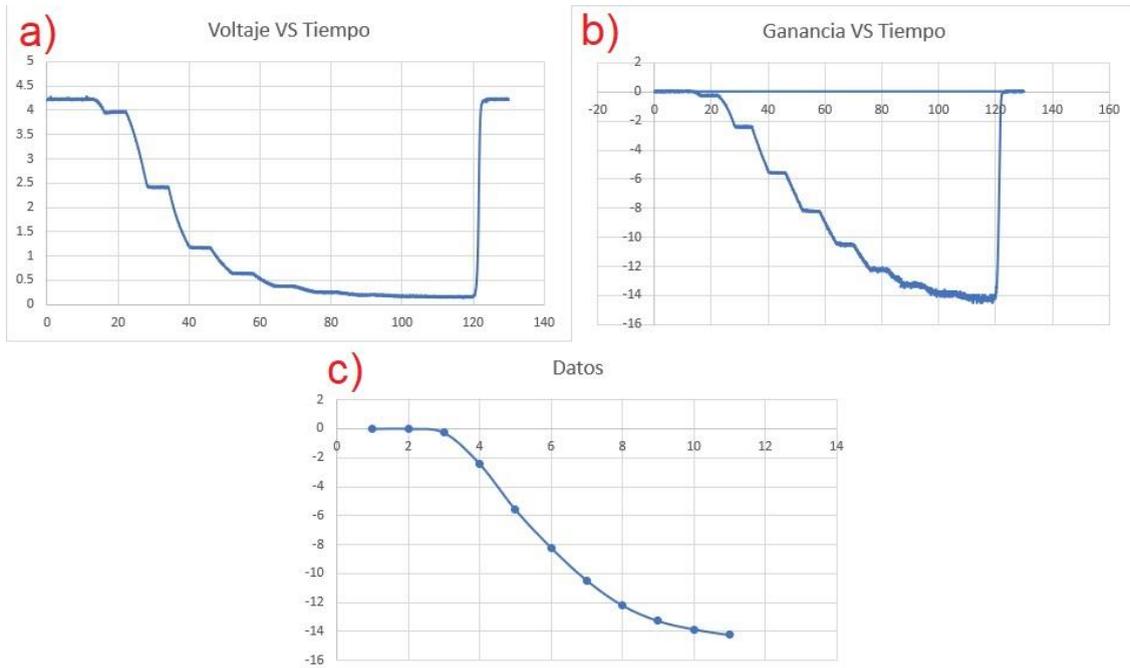


Figura 79. Muestra las gráficas obtenidas de las pruebas preliminares de curvatura. a) Muestra la respuesta del sensor en Voltaje vs Tiempo, b) muestra la gráfica de Ganancia vs Tiempo, c) muestra la gráfica de Ganancia vs Lectura.

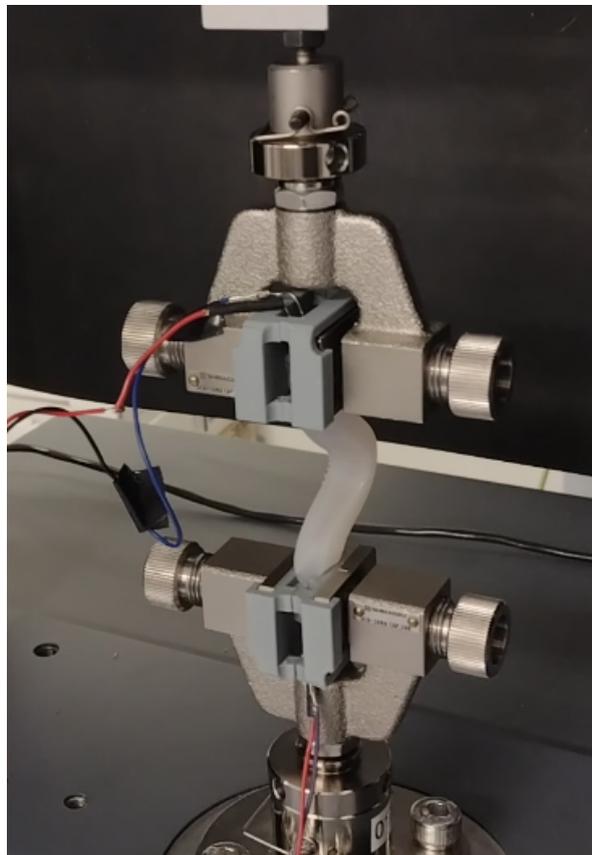


Figura 80. Muestra la probeta sometida al ensayo de curvatura

Entonces, para hacer el ensayo de curvatura se tomaron en consideración los mismos parámetros que se tomaron para la prueba de tracción, con la única diferencia que en vez de estirar el sensor, la distancia entre los extremos se reduciría. La distancia inicial entre los extremos del sensor fue de 70 [mm] y el recorrido máximo que se estableció en el ensayo fue de 20 [mm], el cual se dividió en 10 lecturas para obtener entonces 2 [mm] por lectura. A continuación se muestra la información obtenida del primer sensor. La información correspondiente a los demás sensores que se evaluaron para validar el comportamiento del sensor, puede ser encontrada en el anexo 3.

SENSOR 1

La respuesta del sensor a un estímulo de curvatura es claramente no lineal, y, como veremos más adelante, al igual que como sucedió con la prueba de compresión, la respuesta del sensor es casi nula para valores de curvatura pequeños. La figura 81 muestra las gráficas de cada uno de los ensayos realizados con el primer sensor.

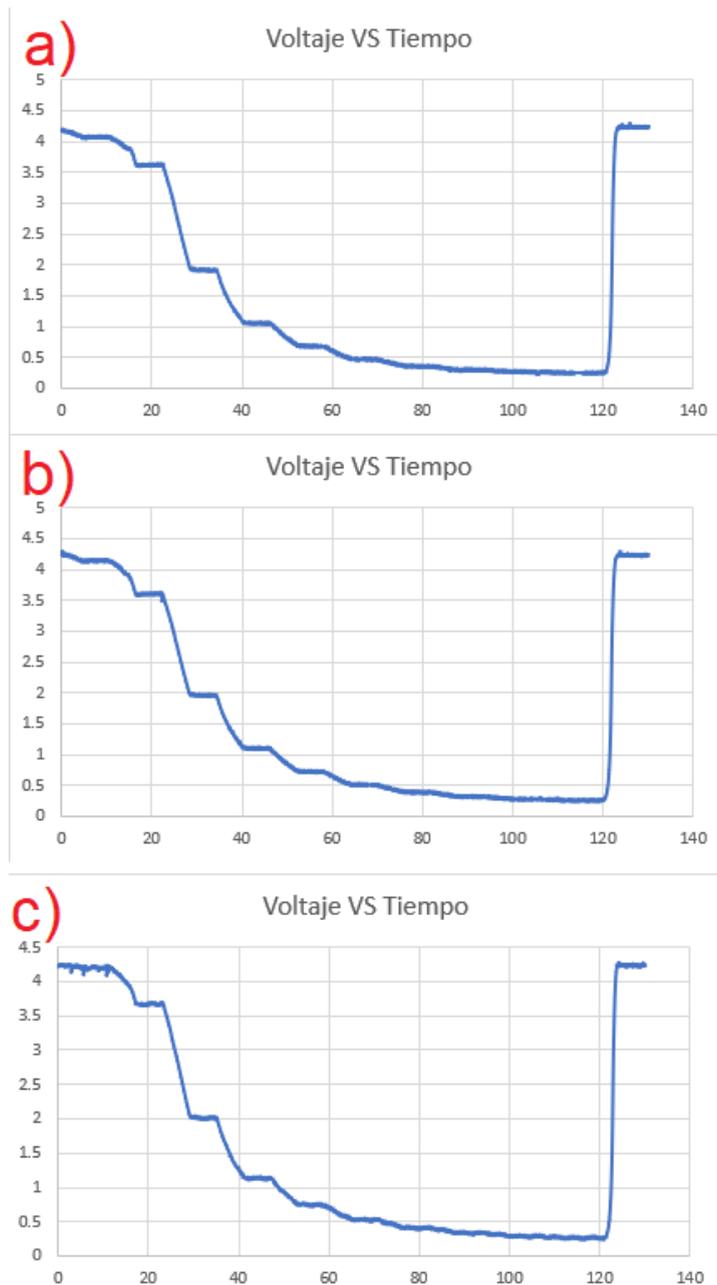


Figura 81. Muestra la respuesta en voltaje del sensor 1 para cada uno de los ensayos. a), b) y c) muestran el primer, segundo y tercer ensayo respectivamente.

A simple vista podría parecer que el sensor no es sensible después de haber transcurrido 100 segundos de la prueba, pero esto no es así, ya que la escala a la que se presentan las gráficas no permite ver las variaciones en la respuesta. El sensor tuvo una respuesta evidente hasta el final del ensayo.

- Análisis de dispersión y ajuste lineal.

Al comparar la respuesta del sensor en cada uno de los ensayos podemos comprobar que la respuesta del sensor es reproducible.

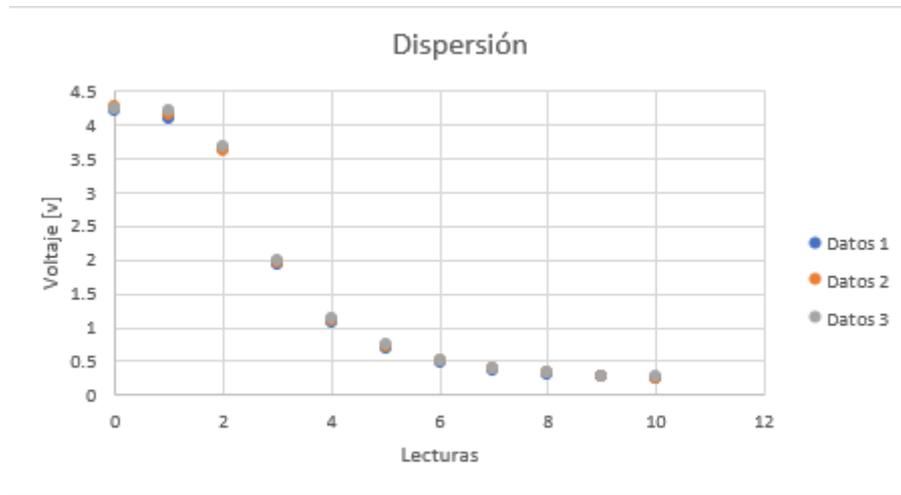


Figura 82. Muestra la comparación entre las lecturas obtenidas en los tres diferentes ensayos del primer sensor

Como claramente la respuesta de este sensor al estímulo de curvatura no fue lineal, el análisis de ajuste de curva y error porcentual se hizo después de realizar el cálculo de constantes características del sensor. Entonces, para el caso especial de este sensor, se presentará la información de ajuste de curva y errores después de explicar el proceso de caracterización.

- Cálculo de constantes características y error porcentual.

Para encontrar las constantes características de este sensor, se estableció como modelo teórico la relación que existe entre la curvatura y las pérdidas de intensidad luminosa propuesta por MARCATILI et. [67] y Zhao et. [68]. Estos autores establecen que las pérdidas por curvatura en una guía de onda pueden ser modeladas por medio de una curva de la forma.

$$\alpha_b = C_1 e^{-C_2 R} + \beta$$

Donde:

α_b = "Coeficiente de atenuación"

R = "Radio de curvatura"

β , C_1 y C_2 son constantes características de la guía de onda.

Ya que la expresión es no lineal, no se puede hacer un ajuste de curva por mínimos cuadrados, por lo que se tomaron los dos puntos extremos y un punto central para iterar y

obtener las constantes características del sensor. Después de haber hecho el ajuste de curva de los tres sensores y ver que el error porcentual era muy alto, se decidió realizar una curva de ajuste con un polinomio de tercer grado. La figura 83 muestra la comparación entre los datos experimentales y los puntos obtenidos por la curva de ajuste.

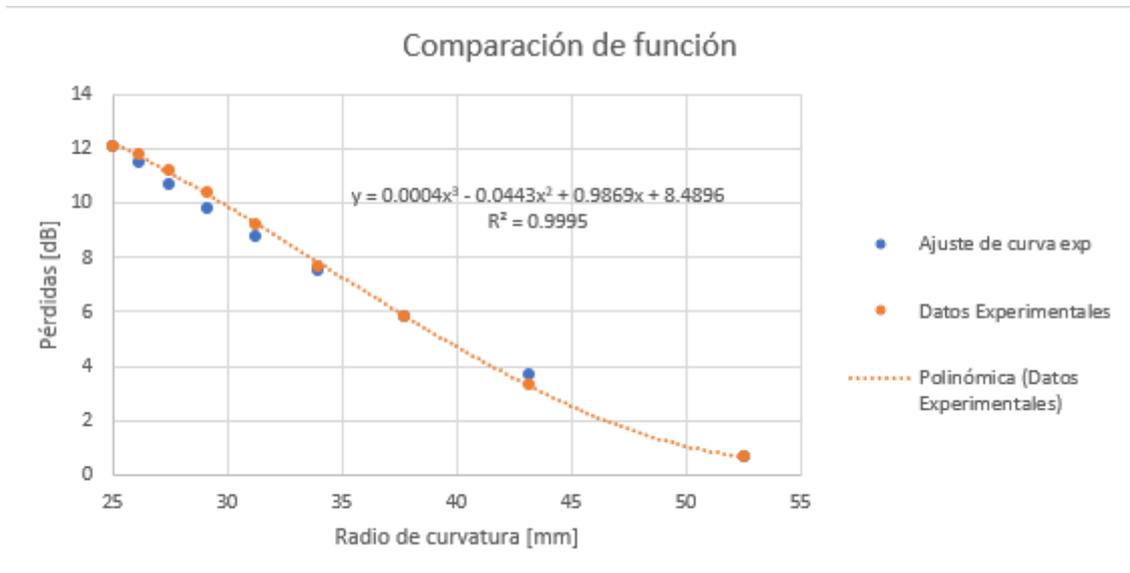


Figura 83. Muestra la gráfica de pérdidas vs radio de curvatura. Los puntos naranja representan los datos experimentales y los puntos azules representan a los datos obtenidos de evaluar la curva de ajuste exponencial.

Para este sensor, las constantes características del ajuste exponencial son $C_1 = 42.92126$ [dB], $C_2 = 0.025075$ [1/mm] y $\beta = -10.843$ [dB]. El coeficiente de determinación resultante de la curva de ajuste exponencial fue de $R^2 = 0.9962$. La forma, las constantes características y el coeficiente de determinación de la curva de ajuste de tercer grado se logran apreciar en la figura 83.

La figura 84 muestra la gráfica de los errores porcentuales tomando como valor ideal los valores obtenidos del ajuste de curva.

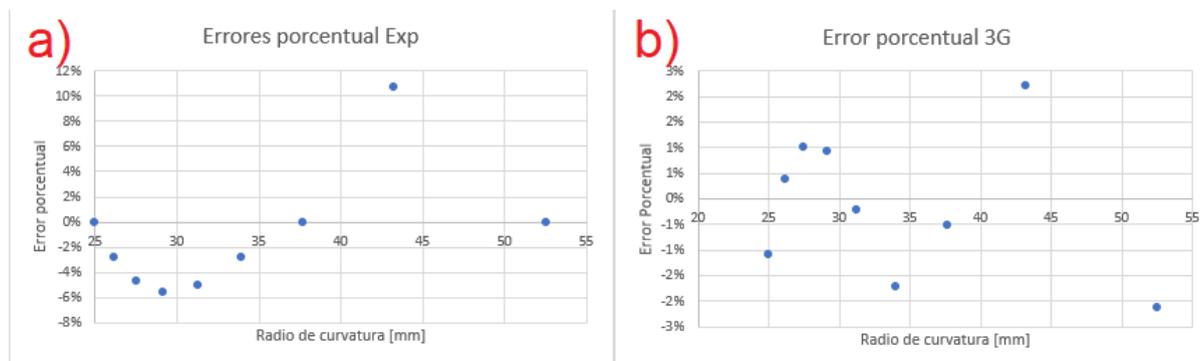


Figura 84. Muestra los errores porcentuales tomando como referencia la línea de tendencia. a) muestra los errores del ajuste exponencial, mientras que b) muestra los errores del ajuste del polinomio de tercer grado

Los errores porcentuales del ajuste exponencial oscilaron entre el -6% y el 11%, por lo que se comprobó que los datos experimentales coinciden con el modelo teórico. Para el caso del ajuste polinómico de tercer grado, los errores oscilaron entre el -2% y el 1%.

Un dato que es importante señalar es el motivo por el cual el sensor es casi insensible a los cambios de curvatura iniciales. Este comportamiento se debe a que la guía de onda tiene cierta tolerancia a la curvatura, la cual está en función de la diferencia entre los índices de refracción de los materiales utilizados. El ángulo máximo al que puede ser sometida una guía de onda sin que tenga pérdidas de intensidad luminosa puede ser calculada recordando el concepto de "Apertura numérica." Como se comentó anteriormente, este concepto relaciona tres índices de refracción, los cuales son el índice de refracción inicial, el índice de refracción del núcleo y el índice de refracción del recubrimiento. Sin embargo, si consideramos que el índice de refracción del inicial es igual al índice de refracción del núcleo, es posible calcular el ángulo máximo que puede curvarse una guía de onda sin perder intensidad luminosa. Para el caso de los sensores, los índices de refracción del núcleo y del recubrimiento son 1.47 y 1.4 respectivamente. Si colocamos estos datos en la ecuación de apertura numérica, obtenemos un ángulo máximo de 17.753° , lo que corresponde a un radio de curvatura aproximado de $R = 80$ [mm] o una curvatura de $\kappa = 0.0125$ [1/mm], al hacer las consideraciones bajo las que se llevó a cabo el ensayo de curvatura.

Después de haber concluido las pruebas, se analizaron los datos obtenidos y se hizo la superposición de las respuestas de los sensores probados bajo las mismas condiciones. Al observar la superposición de las gráficas, se puede ver gráficamente que los sensores tuvieron un comportamiento muy diferente. Las gráficas de superposición de las pruebas para cada una de las áreas y sensores se puede consultar en el anexo 4.

3.4.4 Histéresis

Para observar la histéresis del sensor, se hicieron tres pruebas de tracción, compresión y curvatura en los sensores. Las pruebas consistieron en llevarlos a los extremos de su rango de operación, dividiendo este en diez intervalos. Entonces, para el caso de las pruebas de compresión, el rango de fuerza fue de 0 a 2.5 [N], utilizando un área de 11 [mm] y un intervalo de 0.25 [N] entre cada lectura; la prueba de tracción se realizó en un rango de 0 a 20 [mm] con un intervalo de 2 [mm]; y por último, la prueba de curvatura también se hizo con un rango de operación de 0 a 20 [mm] con un intervalo de 2 [mm]. Para la prueba de curvatura se estimó la curvatura del sensor por medio de las consideraciones mencionadas anteriormente. Las figuras 85, 86 y 87 muestran el comportamiento de un sensor al ser sometido a una secuencia incremental y decremental en los intervalos establecidos para cada prueba.

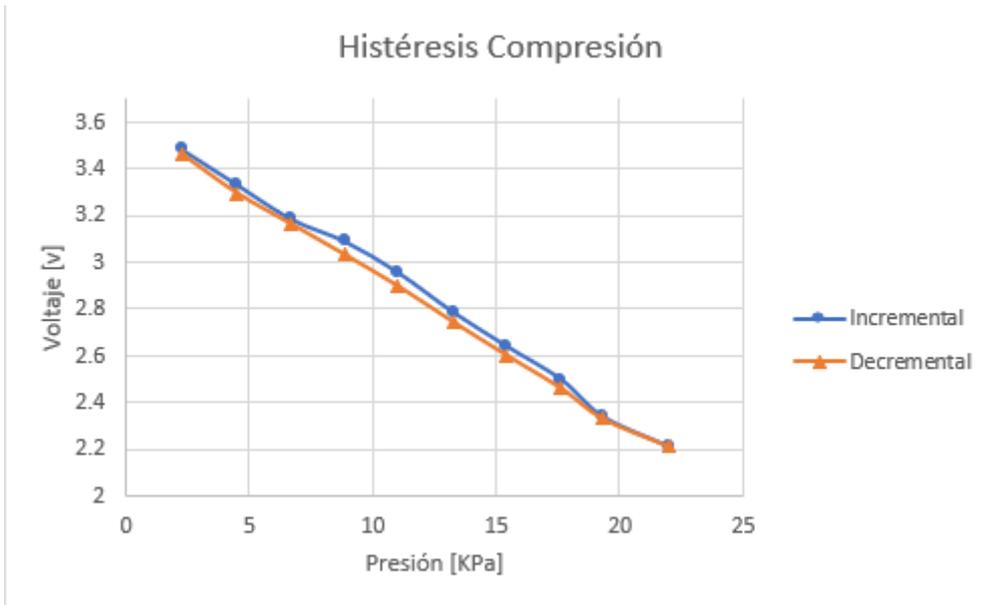


Figura 85. Muestra la curva de histéresis obtenida para la prueba de compresión.

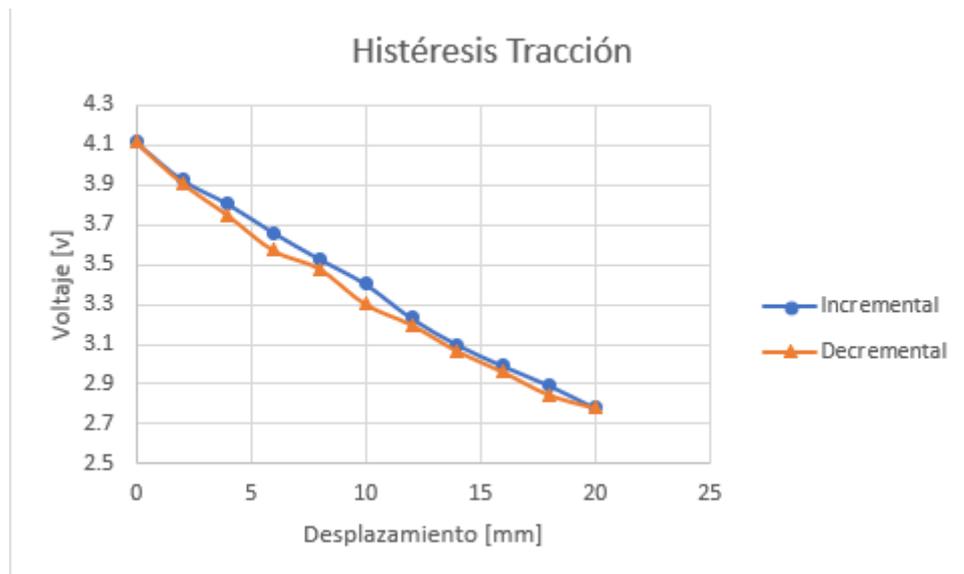


Figura 86. Muestra la curva de histéresis obtenida para la prueba de tracción

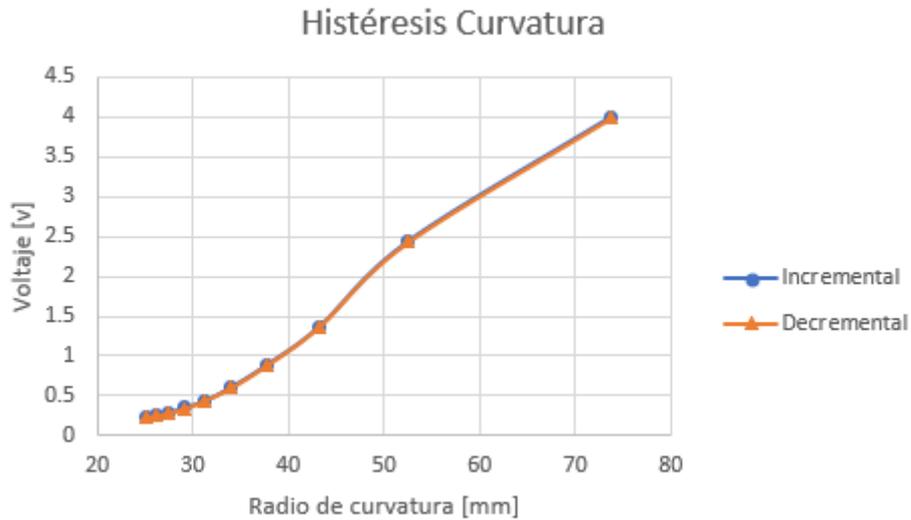


Figura 87. Muestra la curva de histéresis obtenida para la prueba de curvatura.

Para el cálculo de histéresis se consideró la siguiente relación entre el intervalo y la diferencia entre las lecturas máxima:

$$H = \frac{|V_{\text{incremental}} - V_{\text{decremental}}|_{\text{Max}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} \times 100$$

Los valores de histéresis promedio para cada prueba fueron de 1.53% para de compresión, 2.45% para la prueba de tracción, y 0.42% para la prueba de curvatura. Este comportamiento puede ser debido a las características mecánicas de las diferentes siliconas con las que se hizo el sensor, ya que, como se puede ver en las gráficas antes presentadas, en la prueba de compresión y tracción, las cuales someten al sensor a mayores esfuerzos, se puede apreciar una mayor histéresis en comparación con la prueba de curvatura.

CONCLUSIONES

Después de observar el comportamiento del sensor blando al ser sometido a la prueba de compresión, se logra apreciar que, a pesar de que este es muy preciso cuando se trabaja con una área en específico, este no presenta el mismo comportamiento al variar el área manteniendo los mismos valores de presión. Esto podría ser provocado por algunos factores secundarios generados por el mismo el comportamiento del material al ser deformado, como podrían ser el aumento en la curvatura local, modificación de la absorción luminosa, modificaciones en el índice de refracción del material, etc.

Respecto a las pruebas de tracción, el sensor presentó también un alto grado de precisión y mostró un comportamiento casi perfectamente ideal comparado con el modelo constitutivo.

Para la prueba de curvatura, a pesar de que el sensor también presentó un alto grado de precisión, el comportamiento del sensor se ajustó parcialmente al modelo constitutivo esperado. Entonces, reflexionando sobre el costo - beneficio entre los dos modelos considerados para la caracterización del sensor, a pesar de que el fenómeno físico se presentó evidentemente, el ajuste del modelo exponencial utilizó más recursos matemáticos, por lo que se considera más práctico utilizar el modelo de ajuste de tercer grado para la caracterización de este comportamiento.

Adicionalmente, se observó que los diferentes sensores fabricados no presentaron homogeneidad en su curva característica. Esto puede ser atribuido a las mínimas variaciones existentes en la integración de los sensores infrarrojos y leds, a las variaciones en las concentraciones de las siliconas, a la humedad ambiental y a la forma en la que interactuaron las siliconas del núcleo y el recubrimiento principalmente.

Respecto a las modificaciones realizadas a los prototipos reportados en la literatura, se observó que al cambiar el modelo de sensor infrarrojo SFH 229 (OSRAM Licht AG) por el BPW 34 e integrarlo en el núcleo, mejoró considerablemente la señal detectada en el extremo de la guía de onda, por lo que estas modificaciones pueden ser consideradas como una propuesta para mejorar el diseño de este tipo de sensores.

En general, después de hacer el análisis del sensor blando en cuestión, se observó que bajo condiciones controladas el sensor presenta un muy buen comportamiento para realizar mediciones de compresión, tracción y curvatura de algún sistema blando, debido a su alta precisión y baja histéresis. Sin embargo, se observó que el sensor fue muy sensible a la luz ambiental a pesar de que el fotodiodo estaba integrado en el núcleo y cubierto por el recubrimiento. Esta última consideración podría ser eliminada al utilizar una silicona que no permita el paso de la luz ambiental.

TRABAJO A FUTURO

- Tomando en cuenta las observaciones obtenidas en la prueba de compresión, para analizar el comportamiento del sensor descartando los factores secundarios que podrían estar influyendo en este, se analizará el comportamiento del sensor al ser sometido presión homogéneas, las cuales pueden ser generadas en una cámara neumática o hidráulica.
- Para procurar que todos los sensores que se utilizarán posteriormente tengan un comportamiento más homogéneo, se analizarán las variables que pueden estar influyendo en el comportamiento característico de cada sensor.
- Para disminuir la sensibilidad del sensor al ruido ambiental, se realizarán experimentos utilizando diferentes tipos de recubrimiento.
- Analizando las necesidades observadas en el área médica, se planea desarrollar un sistema blando portable, el cual pueda ser usado para la rehabilitación de las extremidades superiores, específicamente manos, en pacientes con problemas de movilidad. Este dispositivo utilizará sensores blandos basados en guía de onda para el control de posición y presión.

REFERENCIAS

- [1] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [2] A. Albu-Schaffer, M. Fischer, G. Schreiber, F. Schoeppe, and G. Hirzinger, "Soft robotics: what Cartesian stiffness can obtain with passively compliant, uncoupled joints?," *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*. doi: 10.1109/iros.2004.1389925.
- [3] D. Trivedi, A. Lotfi, and C. D. Rahn, "Geometrically Exact Models for Soft Robotic Manipulators," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 4. pp. 773–780, 2008. doi: 10.1109/tro.2008.924923.
- [4] G. Robinson and J. B. C. Davies, "Continuum robots - a state of the art," *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*. doi: 10.1109/robot.1999.774029.
- [5] C. Laschi, B. Mazzolai, and M. Cianchetti, "Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities," *Sci Robot*, vol. 1, no. 1, Dec. 2016, doi: 10.1126/scirobotics.aah3690.
- [6] D. Rus and M. T. Tolley, "Design, fabrication and control of soft robots," *Nature*, vol. 521, no. 7553. pp. 467–475, 2015. doi: 10.1038/nature14543.
- [7] R. F. Shepherd *et al.*, "Using Explosions to Power a Soft Robot," *Angewandte Chemie*, vol. 125, no. 10. pp. 2964–2968, 2013. doi: 10.1002/ange.201209540.
- [8] H.-T. Lin, G. G. Leisk, and B. Trimmer, "GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 6, no. 2, p. 026007, Jun. 2011.
- [9] "Peristaltismo." <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002282.htm> (accessed Sep. 13, 2021).
- [10] M. Zhu, W. Xu, and L. K. Cheng, "Esophageal Peristaltic Control of a Soft-Bodied Swallowing Robot by the Central Pattern Generator," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 1. pp. 91–98, 2017. doi: 10.1109/tmech.2016.2609465.
- [11] W. Pang, Y. Fei, and W. He, "Study on motion process of modular soft robot," *2016 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*. 2016. doi: 10.1109/icmlc.2016.7860892.
- [12] M. Calisti *et al.*, "An octopus-bioinspired solution to movement and manipulation for soft robots," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 6, no. 3, p. 036002, Sep. 2011.
- [13] F. G. Serchi, A. Arienti, I. Baldoli, and C. Laschi, "An elastic pulsed-jet thruster for Soft Unmanned Underwater Vehicles," *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2013. doi: 10.1109/icra.2013.6631306.
- [14] F. Renda, F. Giorgio-Serchi, F. Boyer, and C. Laschi, "Modelling cephalopod-inspired pulsed-jet locomotion for underwater soft robots," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 10, no. 5, p. 055005, Sep. 2015.
- [15] E. W. Hawkes, L. H. Blumenschein, J. D. Greer, and A. M. Okamura, "A soft robot that navigates its environment through growth," *Sci Robot*, vol. 2, no. 8, Jul. 2017, doi: 10.1126/scirobotics.aan3028.
- [16] A. Sadeghi, A. Tonazzini, L. Popova, and B. Mazzolai, "A novel growing device inspired by plant root soil penetration behaviors," *PLoS One*, vol. 9, no. 2, p. e90139, Feb. 2014.
- [17] R. F. Shepherd, A. A. Stokes, R. M. D. Nunes, and G. M. Whitesides, "Soft machines that are resistant to puncture and that self seal," *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 46, pp. 6709–6713, Dec. 2013.
- [18] S. Terryn, G. Mathijssen, J. Brancart, D. Lefeber, G. Van Assche, and B. Vanderborght, "Development of a self-healing soft pneumatic actuator: a first concept," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 10, no. 4, p. 046007, Jul. 2015.
- [19] K. Asaka and H. Okuzaki, *Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives*. Springer Nature, 2019.

- [20] A. Katchalsky, "Rapid swelling and deswelling of reversible gels of polymeric acids by ionization," *Experientia*, vol. 5, no. 8, p. 319, Aug. 1949.
- [21] R. P. Hamlen, C. E. Kent, and S. N. Shafer, "Electrolytically Activated Contractile Polymer," *Nature*, vol. 206, no. 4989. pp. 1149–1150, 1965. doi: 10.1038/2061149b0.
- [22] I. Z. Steinberg, A. Oplatka, and A. Katchalsky, "Mechanochemical Engines," *Nature*, vol. 210, no. 5036. pp. 568–571, 1966. doi: 10.1038/210568a0.
- [23] T. Tanaka, "Collapse of Gels and the Critical Endpoint," *Physical Review Letters*, vol. 40, no. 12. pp. 820–823, 1978. doi: 10.1103/physrevlett.40.820.
- [24] F. Agolini and F. P. Gay, "Synthesis and Properties of Azoaromatic Polymers," *Macromolecules*, vol. 3, no. 3. pp. 349–351, 1970. doi: 10.1021/ma60015a015.
- [25] Y. Osada and Y. Saito, "Umwandlung der mechanochemischen Energie in einer Polymermembran durch thermo-reversible Polymer-Polymer-Wechselwirkungen," *Colloid and Polymer Science*, vol. 255, no. 11. pp. 1142–1142, 1977. doi: 10.1007/bf01549937.
- [26] R. H. Baughman, L. W. Shacklette, R. L. Elsenbaumer, E. Plichta, and C. Becht, "Conducting Polymer Electromechanical Actuators," *Conjugated Polymeric Materials: Opportunities in Electronics, Optoelectronics, and Molecular Electronics*. pp. 559–582, 1990. doi: 10.1007/978-94-009-2041-5_44.
- [27] B. Tondu, "Modelling of the McKibben artificial muscle: A review," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 23, no. 3. pp. 225–253, 2012. doi: 10.1177/1045389x11435435.
- [28] T. Ueda, T. Kasazaki, N. Kunitake, T. Hirai, J. Kyokane, and K. Yoshino, "Polyurethane elastomer actuator," *Synthetic Metals*, vol. 85, no. 1–3. pp. 1415–1416, 1997. doi: 10.1016/s0379-6779(97)80299-8.
- [29] Y. Yu, M. Nakano, and T. Ikeda, "Directed bending of a polymer film by light," *Nature*, vol. 425, no. 6954. pp. 145–145, 2003. doi: 10.1038/425145a.
- [30] M. Huhtala, A. Kuronen, and K. Kaski, "Carbon nanotube structures: molecular dynamics simulation at realistic limit," *Computer Physics Communications*, vol. 146, no. 1. pp. 30–37, 2002. doi: 10.1016/s0010-4655(02)00432-0.
- [31] R. H. Baughman, "Carbon Nanotube Actuators," *Science*, vol. 284, no. 5418. pp. 1340–1344, 1999. doi: 10.1126/science.284.5418.1340.
- [32] R. K. Soong, G. D. Bachand, H. P. Neves, A. G. Olkhovets, H. G. Craighead, and C. D. Montemagno, "Powering an inorganic nanodevice with a biomolecular motor," *Science*, vol. 290, no. 5496. pp. 1555–1558, Nov. 2000.
- [33] A. Kakugo, S. Sugimoto, J. P. Gong, and Y. Osada, "Gel Machines Constructed from Chemically Cross-linked Actins and Myosins," *Advanced Materials*, vol. 14, no. 16. p. 1124, 2002. doi: 10.1002/1521-4095(20020816)14:16<1124::aid-adma1124>3.0.co;2-m.
- [34] K. Morishima *et al.*, "3D cell patterning method for bio-actuated microsystem using cultured cardiomyocytes," *Digest of Papers Microprocesses and Nanotechnology 2003. 2003 International Microprocesses and Nanotechnology Conference*. doi: 10.1109/imnc.2003.1268775.
- [35] K. J. Kim and S. Tadokoro, *Electroactive Polymers for Robotic Applications: Artificial Muscles and Sensors*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [36] J. Su, J. S. Harrison, and T. St Clair, "Novel polymeric elastomers for actuation," *ISAF 2000. Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IEEE Cat. No.00CH37076)*. doi: 10.1109/isaf.2000.942442.
- [37] J. D. W. Madden *et al.*, "Artificial Muscle Technology: Physical Principles and Naval Prospects," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 29, no. 3. pp. 706–728, 2004. doi: 10.1109/joe.2004.833135.
- [38] T. Tanaka, I. Nishio, S.-T. Sun, and S. Ueno-Nishio, "Collapse of Gels in an Electric Field," *Science*, vol. 218, no. 4571. pp. 467–469, 1982. doi: 10.1126/science.218.4571.467.
- [39] T. Shiga and T. Kurauchi, "Deformation of polyelectrolyte gels under the influence of electric field," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 39, no. 1112. pp. 2305–2320, 1990. doi: 10.1002/app.1990.070391110.

- [40] M. Zrinyi, "Magnetically responsive polymer gels and elastomers: properties, synthesis and applications," *Smart Polymers and their Applications*. pp. 134–165, 2014. doi: 10.1533/9780857097026.1.134.
- [41] T. Xu, J. Zhang, M. Salehizadeh, O. Onaizah, and E. Diller, "Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions," *Sci Robot*, vol. 4, no. 29, Apr. 2019, doi: 10.1126/scirobotics.aav4494.
- [42] Y. Bar-Cohen, *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges*. SPIE Press, 2004.
- [43] H. Ichijo *et al.*, "Thermo-responsive gels," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 46, no. 2. pp. 185–190, 1995. doi: 10.1016/0969-806x(95)00011-l.
- [44] S. I. Rich, R. J. Wood, and C. Majidi, "Untethered soft robotics," *Nature Electronics*, vol. 1, no. 2. pp. 102–112, 2018. doi: 10.1038/s41928-018-0024-1.
- [45] "PneuNets Bending Actuators." <https://softroboticstoolkit.com/book/pneunets-bending-actuator> (accessed Mar. 13, 2022).
- [46] J. Wang, Y. Fei, and W. Pang, "Design, Modeling, and Testing of a Soft Pneumatic Glove With Segmented PneuNets Bending Actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 3. pp. 990–1001, 2019. doi: 10.1109/tmech.2019.2911992.
- [47] Y. Yu and T. Ikeda, "Alignment modulation of azobenzene-containing liquid crystal systems by photochemical reactions," *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 5, no. 3. pp. 247–265, 2004. doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2004.10.004.
- [48] M. Rogóż, H. Zeng, C. Xuan, D. S. Wiersma, and P. Wasylczyk, "Light-Driven Soft Robot Mimics Caterpillar Locomotion in Natural Scale," *Advanced Optical Materials*, vol. 4, no. 11. pp. 1689–1694, 2016. doi: 10.1002/adom.201600503.
- [49] Y. Park, B. Chen, and R. J. Wood, "Design and Fabrication of Soft Artificial Skin Using Embedded Microchannels and Liquid Conductors," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 8, pp. 2711–2718, Aug. 2012.
- [50] C. Larson *et al.*, "Highly stretchable electroluminescent skin for optical signaling and tactile sensing," *Science*, vol. 351, no. 6277. pp. 1071–1074, 2016. doi: 10.1126/science.aac5082.
- [51] H. Zhao, K. O'Brien, S. Li, and R. F. Shepherd, "Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides," *Sci Robot*, vol. 1, no. 1, Dec. 2016, doi: 10.1126/scirobotics.aai7529.
- [52] T. P. Tomo *et al.*, "Covering a Robot Fingertip With uSkin: A Soft Electronic Skin With Distributed 3-Axis Force Sensitive Elements for Robot Hands," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 1. pp. 124–131, 2018. doi: 10.1109/lra.2017.2734965.
- [53] W. Felt and C. David Remy, "Smart braid: Air muscles that measure force and displacement," *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2014. doi: 10.1109/iroso.2014.6942949.
- [54] E. Hecht, *Óptica*. ADDISON WESLEY, 1999.
- [55] D. Malacara, *Óptica básica*. Fondo de Cultura Económica, 2015.
- [56] S. J. M., *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. Pearson Education India, 2009.
- [57] M. Diem, *Quantum Mechanical Foundations of Molecular Spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2021.
- [58] L. G. C. Ramírez, G. S. A. Jiménez, and J. M. Carreño, *Sensores y Actuadores*. Grupo Editorial Patria, 2014.
- [59] R. Bansal, *Handbook of Engineering Electromagnetics*. CRC Press, 2004.
- [60] F. Schmitt, O. Piccin, L. Barbé, and B. Bayle, "Soft Robots Manufacturing: A Review," *Front Robot AI*, vol. 5, p. 84, Jul. 2018.
- [61] C. M. Larson *et al.*, "Direct Ink Writing of Silicon Carbide for Microwave Optics," *Advanced Engineering Materials*, vol. 18, no. 1. pp. 39–45, 2016. doi: 10.1002/adem.201500298.
- [62] J. W. Boley, J. William Boley, E. L. White, G. T.-C. Chiu, and R. K. Kramer, "Stretchable

- Electronics: Direct Writing of Gallium-Indium Alloy for Stretchable Electronics (Adv. Funct. Mater. 23/2014),” *Advanced Functional Materials*, vol. 24, no. 23. pp. 3474–3474, 2014. doi: 10.1002/adfm.201470149.
- [63] B. Baker, “How to Design Stable Transimpedance Amplifiers for Automotive and Medical Systems,” *Digi-Key Electronics*, Jun. 28, 2017.
<https://www.digikey.com.mx/es/articles/how-to-design-stable-transimpedance-amplifiers-automotive-medical-systems> (accessed May 17, 2022).
- [64] “Transimpedance Amplifier - Current to Voltage Converter.”
<https://circuitdigest.com/tutorial/transimpedance-amplifier-design-working-and-applications> (accessed May 23, 2022).
- [65] J. G. Graeme, *Photodiode Amplifiers: OP AMP Solutions*. McGraw Hill Professional, 1996.
- [66] H. Bai, S. Li, J. Barreiros, Y. Tu, C. R. Pollock, and R. F. Shepherd, “Stretchable distributed fiber-optic sensors,” *Science*, vol. 370, no. 6518, pp. 848–852, Nov. 2020.
- [67] E. A. J. Marcatili and S. E. Miller, “Improved Relations Describing Directional Control in Electromagnetic Wave Guidance,” *Bell System Technical Journal*, vol. 48, no. 7. pp. 2161–2188, 1969. doi: 10.1002/j.1538-7305.1969.tb01169.x.
- [68] C. Zhao, L. Chen, L. Xu, and L. Liu, “Weak One-Dimensional Field Confinement Silica Waveguides,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 4. pp. 1–11, 2020. doi: 10.1109/jphot.2020.3007721.

ANEXOS

Anexo 1

En este anexo se presenta de forma gráfica la información correspondiente a las pruebas de compresión realizadas con los diferentes valores de áreas en cada uno de los sensores.

SENSOR 1

Área 160 mm²

- Cálculo de constantes características del sensor.

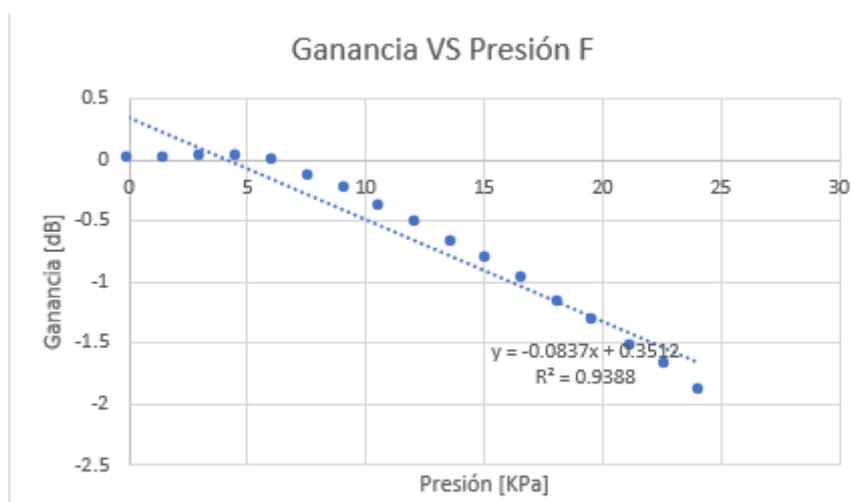


Figura A1.1. Muestra la gráfica de Ganancia vs Presión y su línea de tendencia.

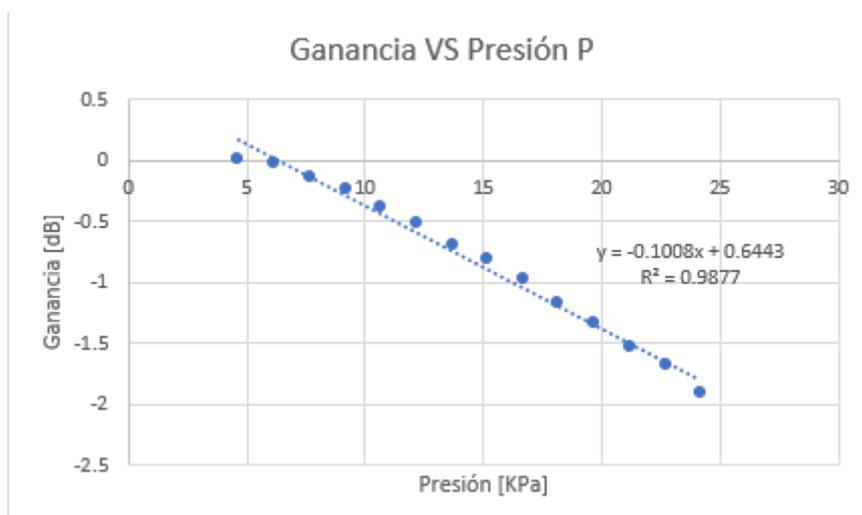


Figura A1.2. Muestra la gráfica de Ganancia VS Presión y la línea de tendencia si se considera que el rango de operación del sensor es mayor a 5 [KPa]

Para este sensor, como se puede ver en la figura A1.2, el sensor tiene un comportamiento lineal de la forma $y = ax + b$ donde “a” tiene un valor de $a = -0.1008$ [dB/KPa], y “b” un valor de $b = 0.6443$ [dB].

Área 210 mm²

- Cálculo de constantes características del sensor.

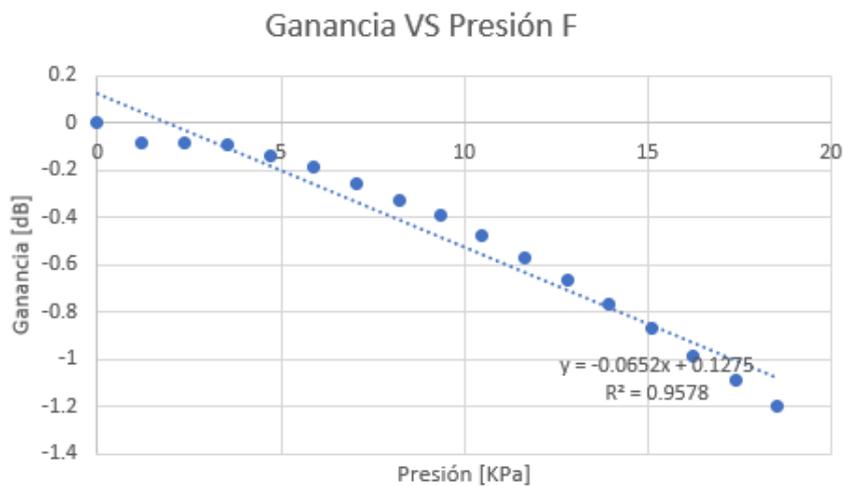


Figura A1.3. Muestra la gráfica de Ganancia vs Presión y su línea de tendencia.

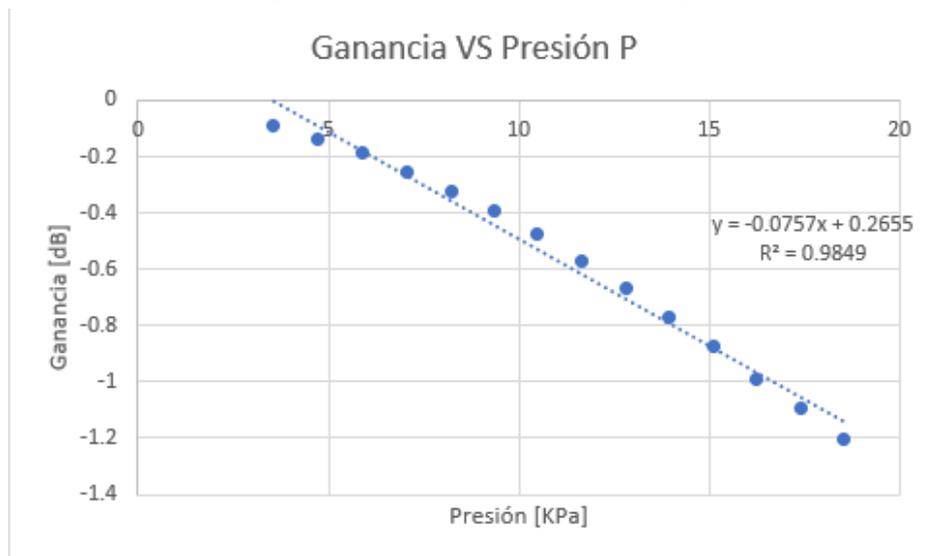


Figura A1.4. Muestra la gráfica de Ganancia VS Presión y la línea de tendencia si se considera que el rango de operación del sensor es mayor a 5 [KPa]

Para este sensor, como se puede ver en la figura A1.4, el sensor tiene un comportamiento lineal de la forma $y = ax + b$ donde “a” tiene un valor de $a = -0.0757$ [dB/KPa], y “b” un valor de $b = 0.2655$ [dB].

SENSOR 2

Área 110 mm²

- Cálculo de constantes características del sensor.

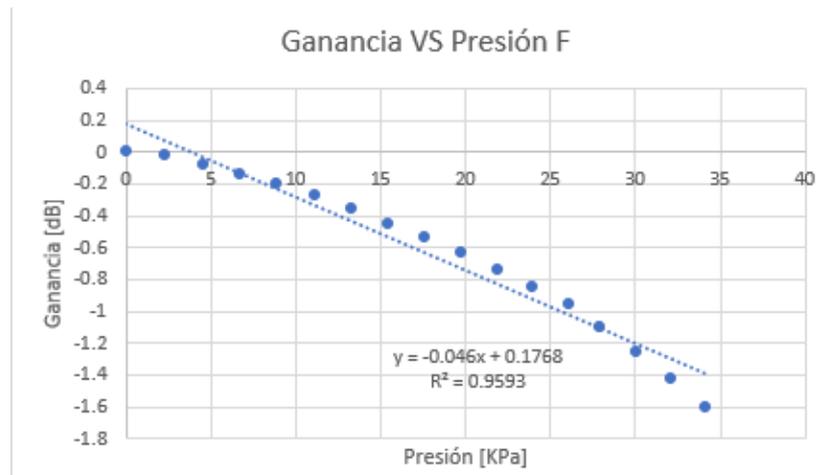


Figura A1.5. Muestra la gráfica de Ganancia vs Presión y su línea de tendencia.

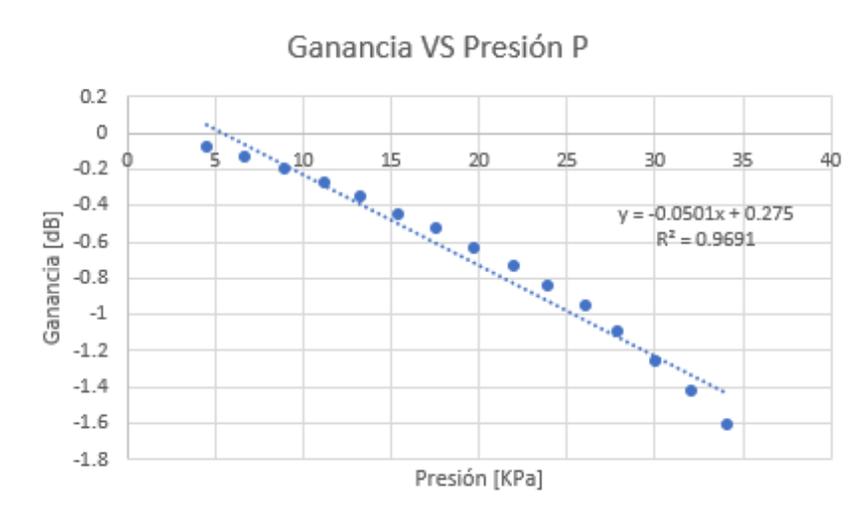


Figura A1.6. Muestra la gráfica de Ganancia VS Presión y la línea de tendencia si se considera que el rango de operación del sensor es mayor a 5 [KPa]

Para este sensor, como se puede ver en la figura A1.6, el sensor tiene un comportamiento lineal de la forma $y = ax + b$ donde “a” tiene un valor de $a = -0.0501$ [dB/KPa], y “b” un valor de $b = 0.275$ [dB].

Área 160 mm²

- Cálculo de constantes características del sensor.

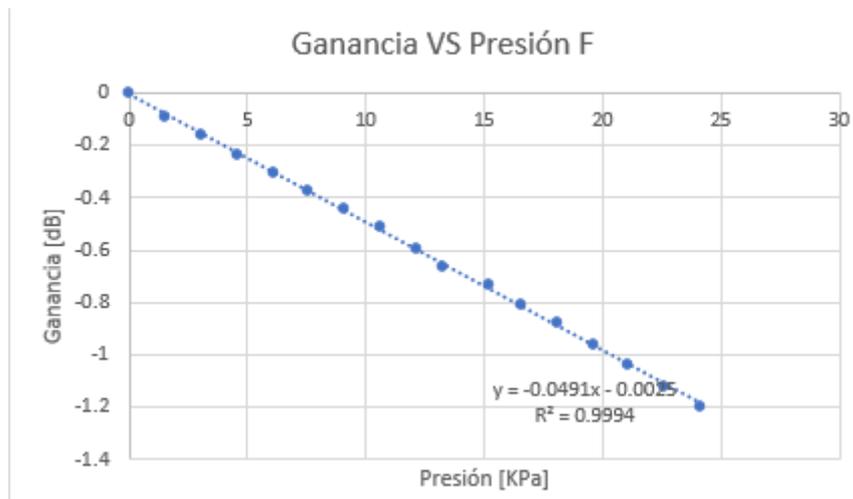


Figura A1.7. Muestra la gráfica de Ganancia vs Presión y su línea de tendencia.

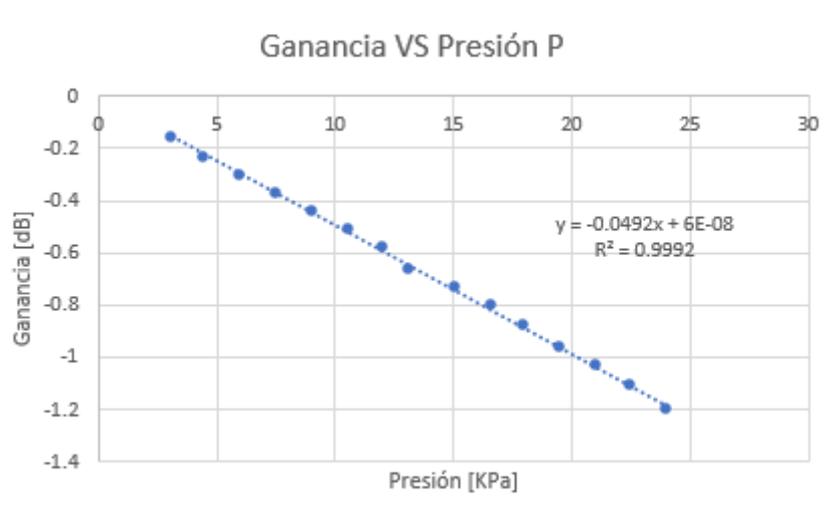


Figura A1.8. Muestra la gráfica de Ganancia VS Presión y la línea de tendencia si se considera que el rango de operación del sensor es mayor a 5 [KPa]

Para este sensor, como se puede ver en la figura A1.8, el sensor tiene un comportamiento lineal de la forma $y = ax + b$ donde "a" tiene un valor de $a = -0.0492$ [dB/KPa], y "b" un valor de $b = 6 \times 10^{-8}$ [dB].

Área 210 mm²

- Cálculo de constantes características del sensor.

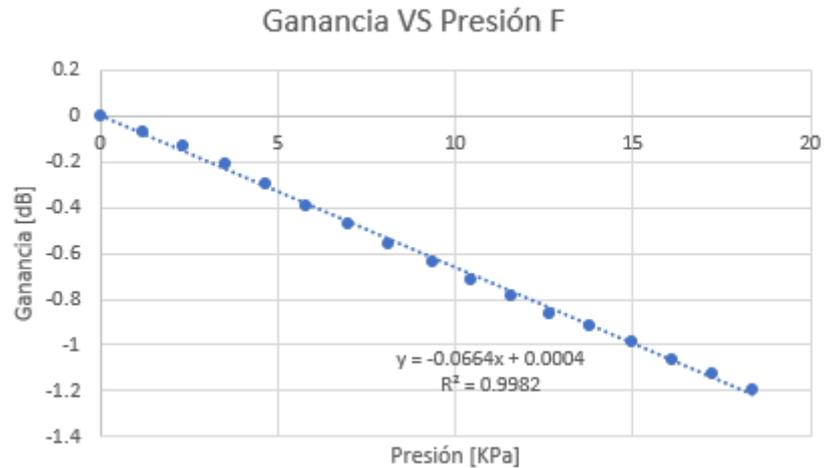


Figura A1.9. Muestra la gráfica de Ganancia vs Presión y su línea de tendencia.

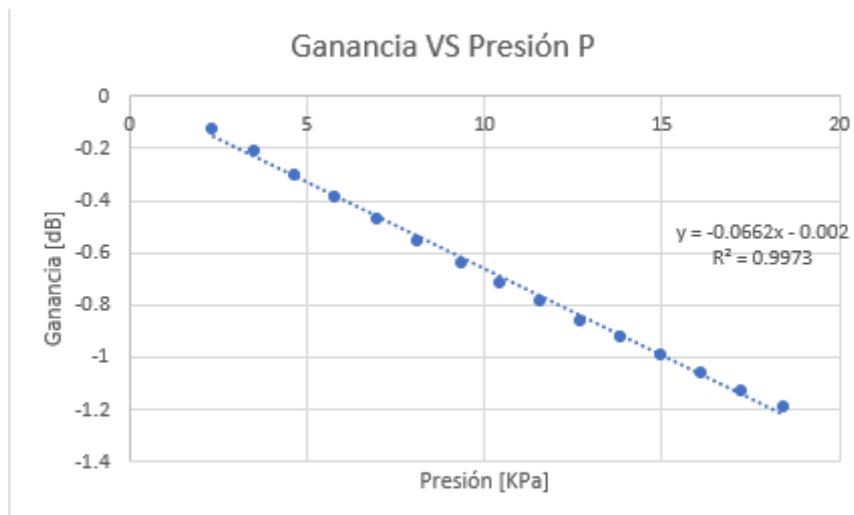


Figura A1.10. Muestra la gráfica de Ganancia VS Presión y la línea de tendencia si se considera que el rango de operación del sensor es mayor a 5 [KPa]

Para este sensor, como se puede ver en la figura A1.10, el sensor tiene un comportamiento lineal de la forma $y = ax + b$ donde "a" tiene un valor de $a = -0.0662$ [dB/KPa], y "b" un valor de $b = 0.002$ [dB].

SENSOR 3

Área 110 mm²

- Cálculo de constantes características del sensor.

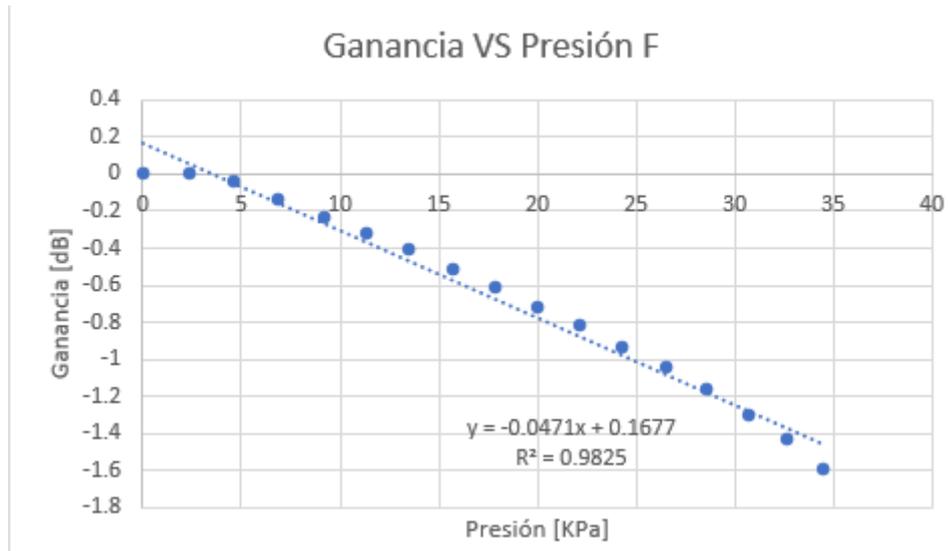


Figura A1.11. Muestra la gráfica de Ganancia vs Presión y su línea de tendencia.

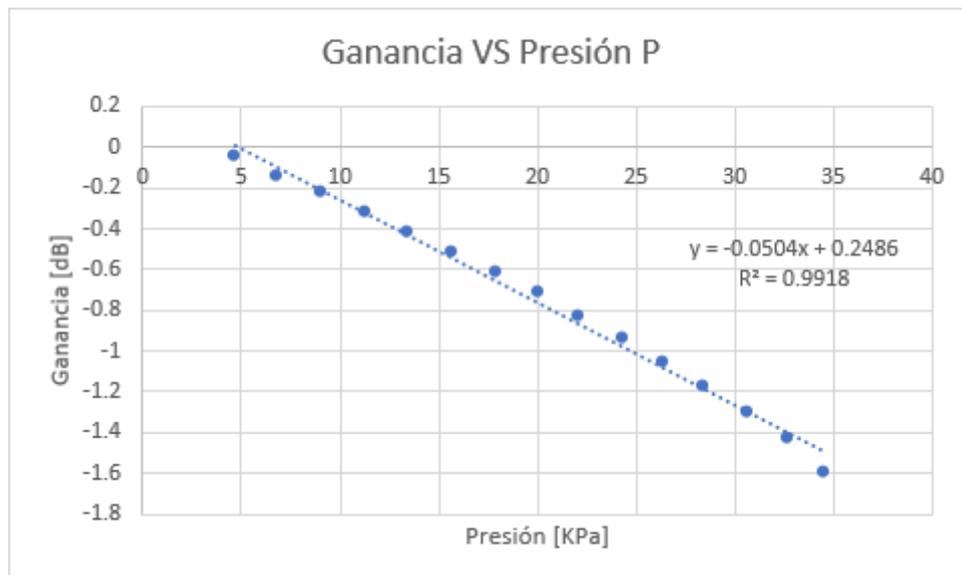


Figura A1.12. Muestra la gráfica de Ganancia VS Presión y la línea de tendencia si se considera que el rango de operación del sensor es mayor a 5 [KPa]

Por lo tanto, como se puede ver en la figura A1.12, se consideró que el sensor tiene un comportamiento lineal de la forma $y = ax + b$ donde "a" tiene un valor de $a = -0.0504$ [dB/KPa], y "b" un valor de $b = 0.2486$ [dB].

Área 160 mm²

- Cálculo de constantes características del sensor.

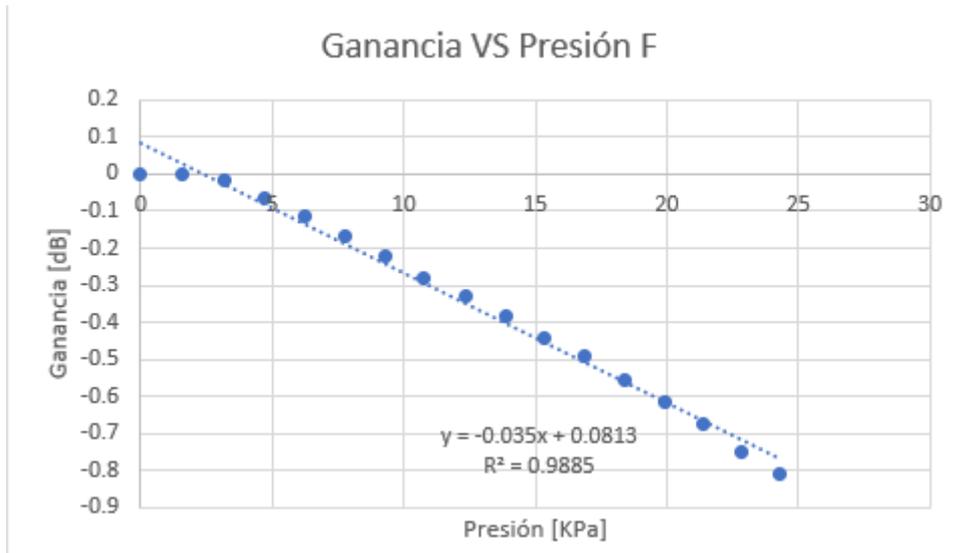


Figura A1.13. Muestra la gráfica de Ganancia vs Presión y su línea de tendencia.

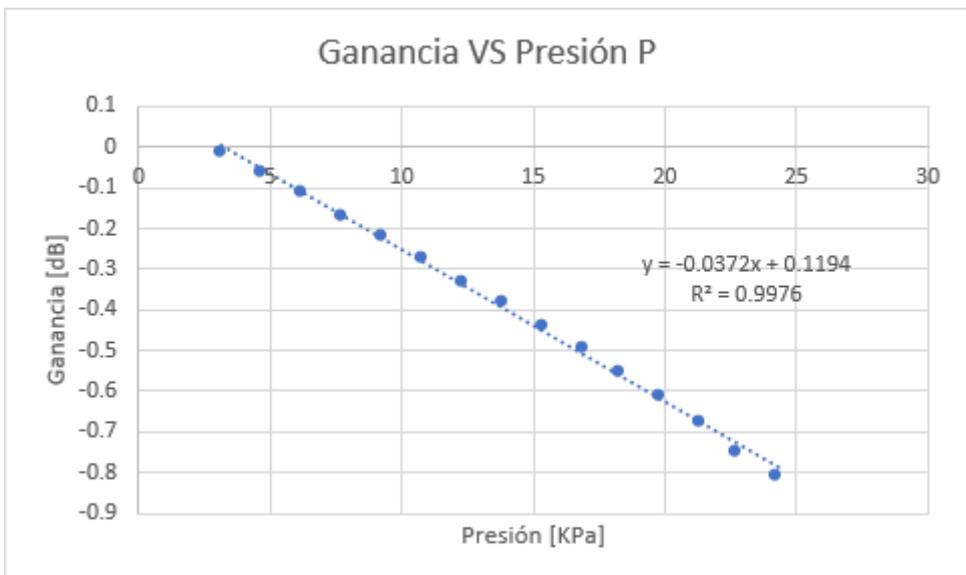


Figura A1.14. Muestra la gráfica de Ganancia VS Presión y la línea de tendencia si se considera que el rango de operación del sensor es mayor a 5 [KPa]

Para este sensor, como se puede ver en la figura A1.14, el sensor tiene un comportamiento lineal de la forma $y = ax + b$ donde "a" tiene un valor de $a = -0.0372$ [dB/KPa], y "b" un valor de $b = 0.1194$ [dB].

Área 210 mm²

- Cálculo de constantes características del sensor.

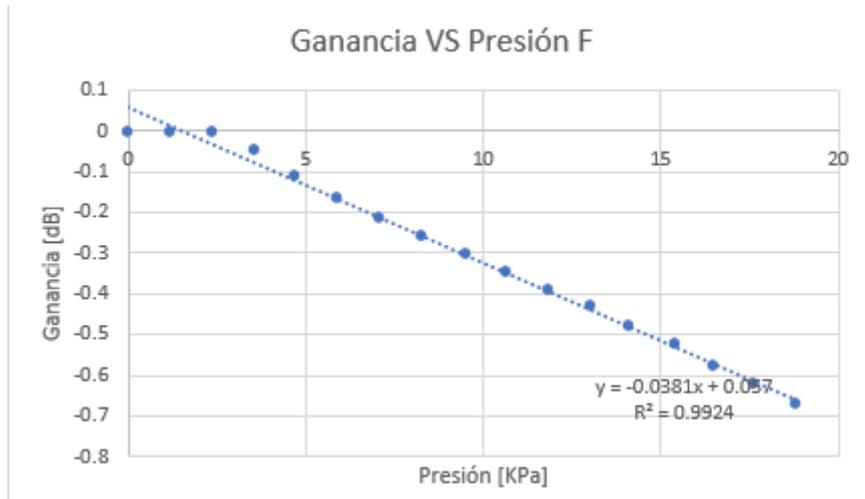


Figura A1.15. Muestra la gráfica de Ganancia vs Presión y su línea de tendencia.

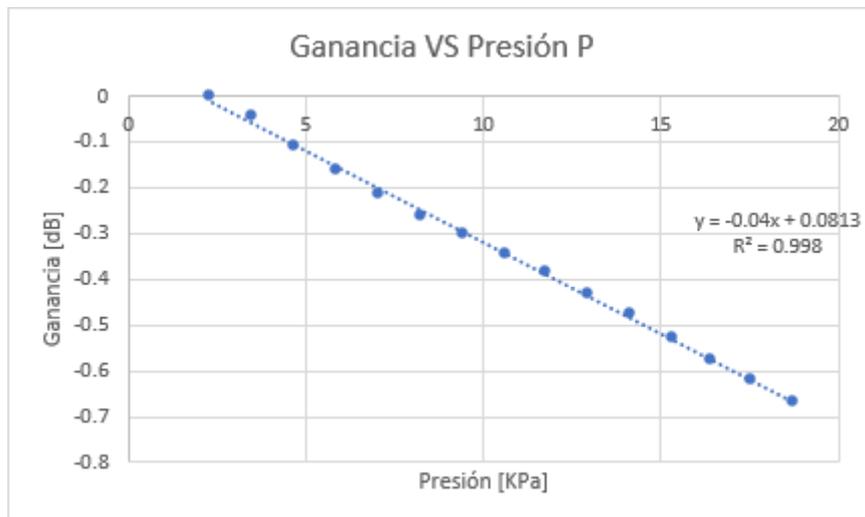


Figura A1.16. Muestra la gráfica de Ganancia VS Presión y la línea de tendencia si se considera que el rango de operación del sensor es mayor a 5 [KPa]

Para este sensor, como se puede ver en la figura A1.16, el sensor tiene un comportamiento lineal de la forma $y = ax + b$ donde "a" tiene un valor de $a = -0.04$ [dB/KPa], y "b" un valor de $b = 0.0813$ [dB].

Integración

Para poder observar cómo era el comportamiento del sensor al ser ensayado con el mismo patrón de fuerzas pero con diferentes áreas, después de verificar que el comportamiento del sensor era reproducible y tener las gráficas de valores promedio correspondientes, se hizo una comparación entre el comportamiento del sensor en cada una de las áreas. Sin embargo, como se comentó anteriormente, el comportamiento del sensor no presentó una sola tendencia para todas las áreas. Este comportamiento también se puede observar al comparar la pendiente y la ordenada al origen de las gráficas mostradas anteriormente. La figura A1.17, A1.18 y A1.19 muestran las gráficas de ganancia vs presión de cada una de las áreas correspondientes a los sensores 1, 2 y 3 respectivamente.

SENSOR 1

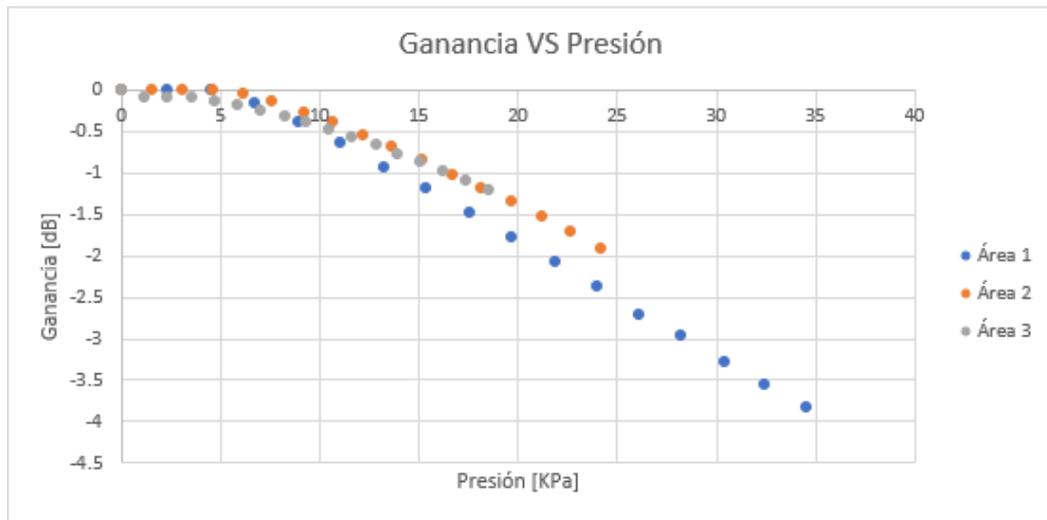


Figura A1.17. Muestra la comparación de cada una de las gráficas de ganancia vs presión del **sensor 1**. Las áreas 1,2 y 3 corresponden a las áreas de 110, 160 y 210 [mm²] respectivamente.

SENSOR 2

Para el caso particular del área de 210 [mm²] en el sensor 2, es importante señalar que muy probablemente se haya realizado una lectura errónea, ya que si se analiza el comportamiento del área de 160 [mm²] y la de 210 [mm²], su comportamiento es prácticamente el mismo, por lo que se concluye que posiblemente se hayan tomado las lecturas del ensayo del área de 210 [mm²] con el área de 160 [mm²]. Sin embargo, al comparar el comportamiento de este sensor con los otros dos evaluados, esté específicamente mostró un comportamiento diferente. La figura 71 muestra las gráficas de ganancia vs presión de cada una de las áreas.

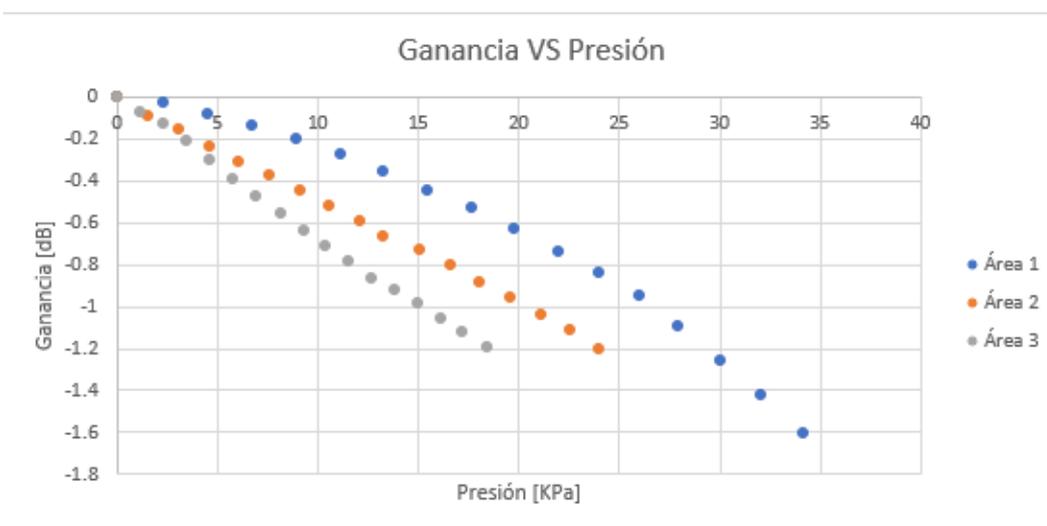


Figura A1.18. Muestra la comparación de cada una de las gráficas de ganancia vs presión del **sensor 2**. Las áreas 1,2 y 3 corresponden a las áreas de 110, 160 y 210 [mm²] respectivamente.

SENSOR 3

A diferencia de los dos sensores anteriores, este sensor tuvo un comportamiento más aproximado al esperado, ya que sus líneas de tendencia entre cada una de las áreas fueron más aproximadas, sin embargo, el cambio en la respuesta del sensor al cambiar el área fue evidente. La figura 72 muestra las gráficas de ganancia vs presión de cada una de las áreas.

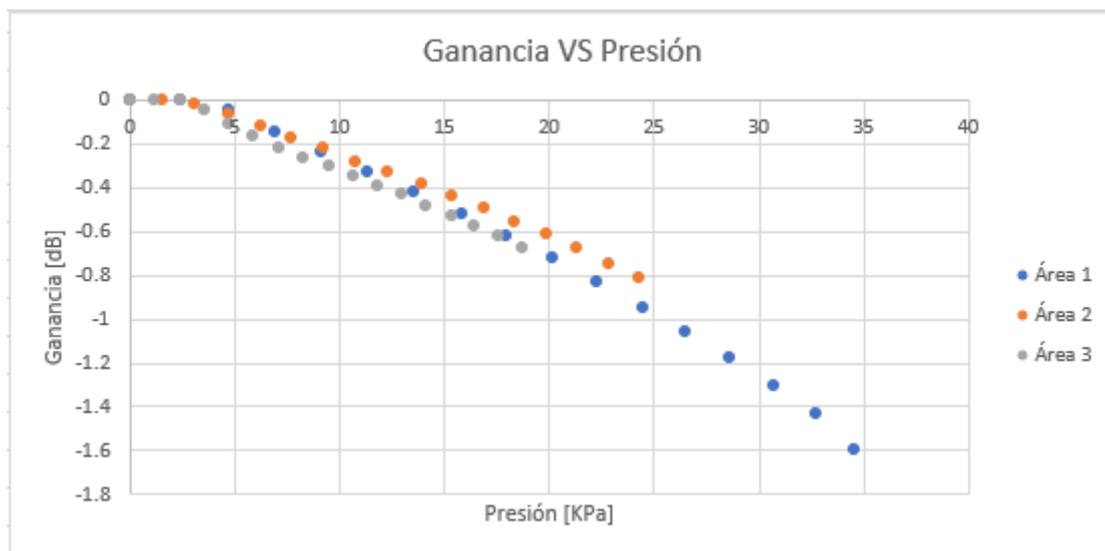


Figura A1.19. Muestra la comparación de cada una de las gráficas de ganancia vs presión del sensor 3. Las áreas 1, 2 y 3 corresponden a las áreas de 110, 160 y 210 [mm²] respectivamente.

Anexo 2

En este anexo se presenta de forma resumida la información correspondiente a las pruebas de tracción realizadas con los diferentes sensores.

SENSOR 2

- Dispersión

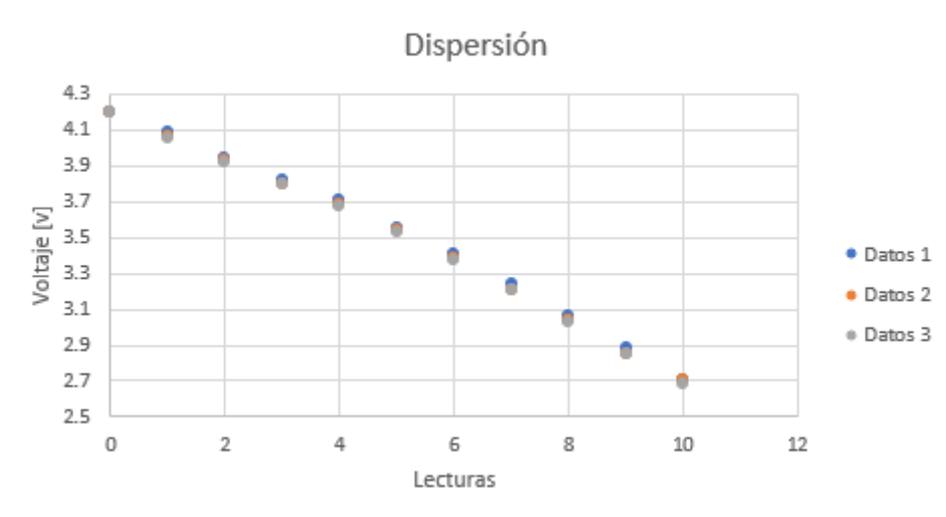


Figura A2.1. Muestra la comparación entre las lecturas obtenidas en los tres diferentes ensayos del segundo sensor

- Cálculo de constantes características del sensor.

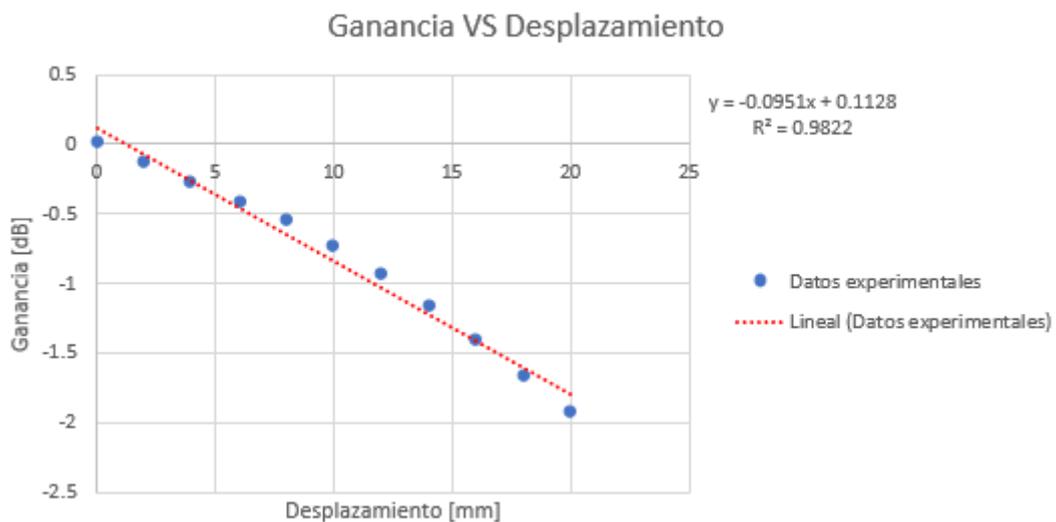


Figura A2.2. Muestra la gráfica de Ganancia vs Desplazamiento y su línea de tendencia.

Para este sensor, como se puede ver en la figura A2.2, las constantes características son **a = -0.0951 [dB/mm]** y **b = 0.1128 [dB]**

SENSOR 3

- Dispersión

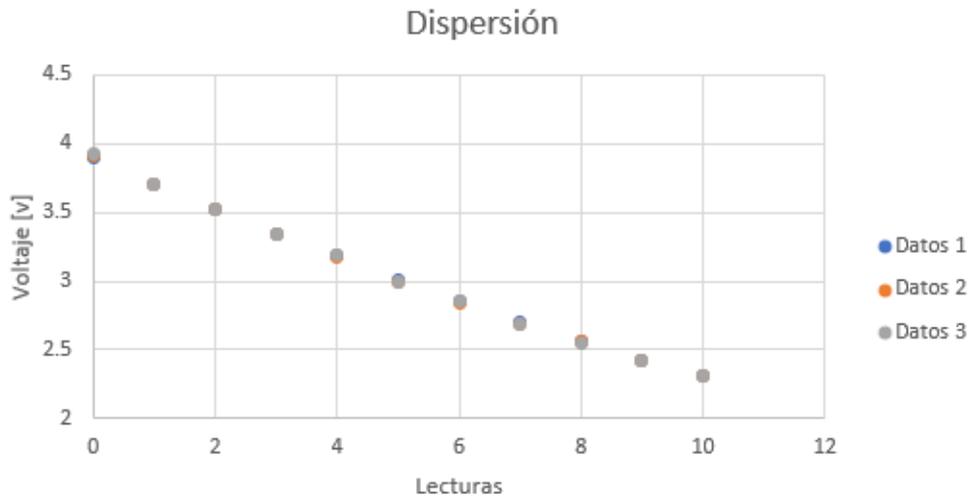


Figura A2.3. Muestra la comparación entre las lecturas obtenidas en los tres diferentes ensayos del tercer sensor

- Cálculo de constantes características del sensor.

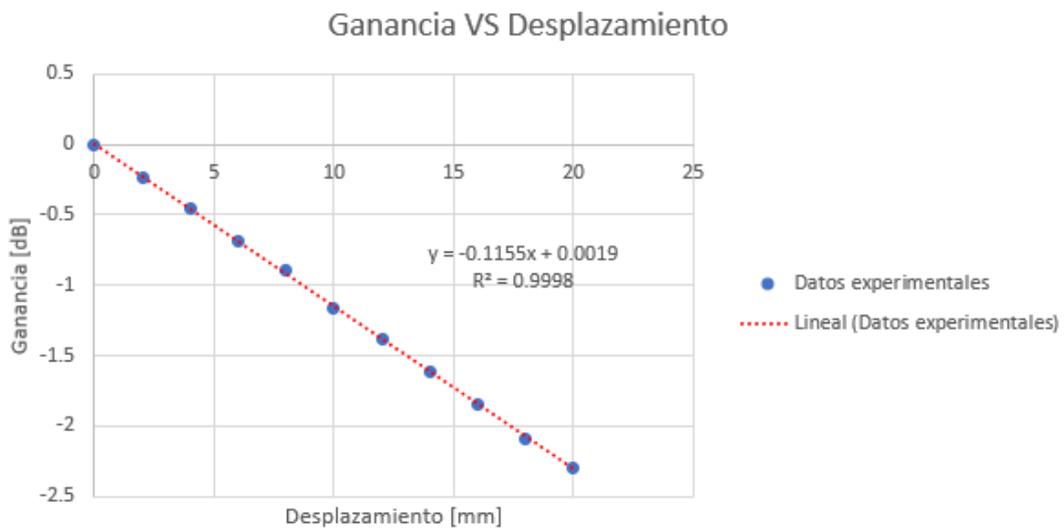


Figura A2.4. Muestra la gráfica de Ganancia vs Desplazamiento y su línea de tendencia.

Para este sensor, como se puede ver en la figura A2.4, las constantes características son **a = -0.1155 [dB/mm]** y **b = 0.0019 [dB]**

Anexo 3

SENSOR 2

- Análisis de dispersión, ajuste lineal y error porcentual de cada sensor.

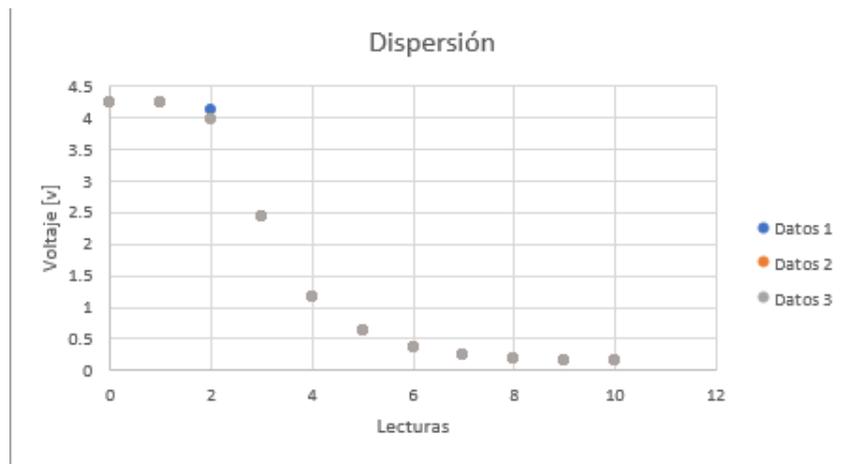


Figura A3.1. Muestra la comparación entre las lecturas obtenidas en los tres diferentes ensayos del segundo sensor

- Cálculo de constantes características del sensor.

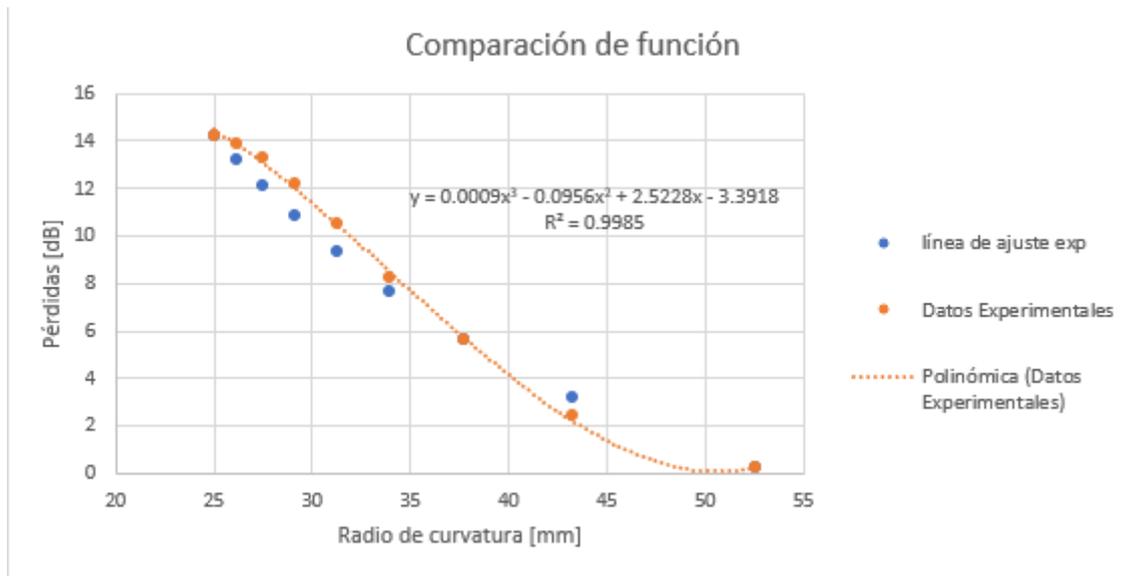


Figura A3.2. Muestra la gráfica de pérdidas vs radio de curvatura.

Para este sensor, las constantes características del ajuste exponencial son $C_1 = 61.7168$ [dB], $C_2 = 0.0461543$ [1/mm] y $\beta = -5.24149$ [dB]. El coeficiente de determinación resultante de la curva de ajuste exponencial fue de $R^2 = 0.9874$. La forma, las constantes características y el coeficiente de determinación de la curva de ajuste de tercer grado se logran apreciar en la figura A3.2.

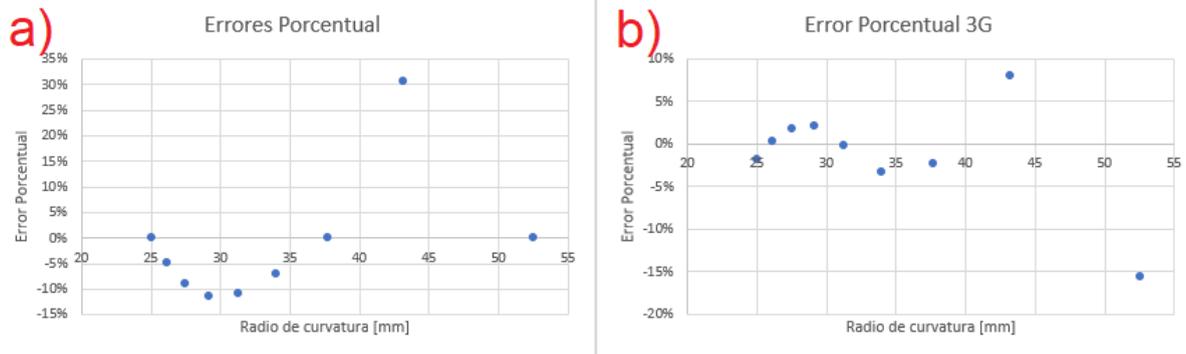


Figura A3.3. Muestra los errores porcentuales tomando como referencia la línea de tendencia. a) muestra los errores del ajuste exponencial, mientras que b) muestra los errores del ajuste del polinomio de tercer grado

Los errores porcentuales oscilaron entre el -11% y el 31%. A pesar de que los errores porcentuales en este sensor fueron mayores, el coeficiente de determinación nos indica que la línea de ajuste es muy parecida a los datos experimentales. Para el caso del ajuste polinómico de tercer grado, los errores oscilaron entre el -15% y el 8%.

SENSOR 3

- Análisis de dispersión, ajuste lineal y error porcentual de cada sensor.

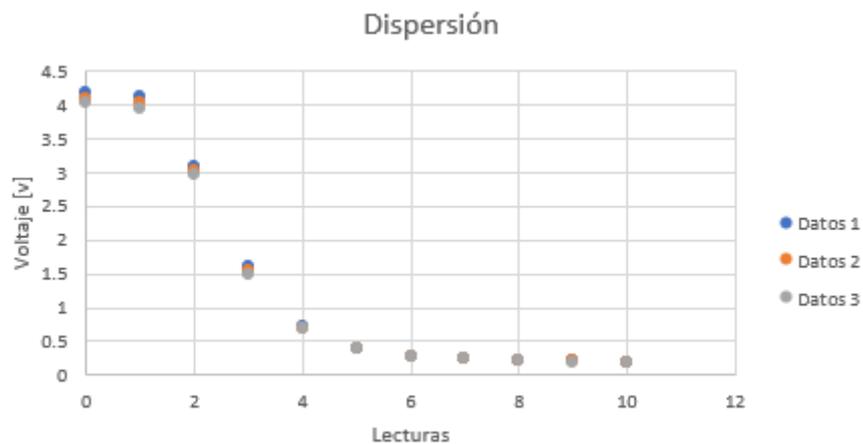


Figura A3.4. Muestra la comparación entre las lecturas obtenidas en los tres diferentes ensayos del segundo sensor

- Cálculo de constantes características del sensor.

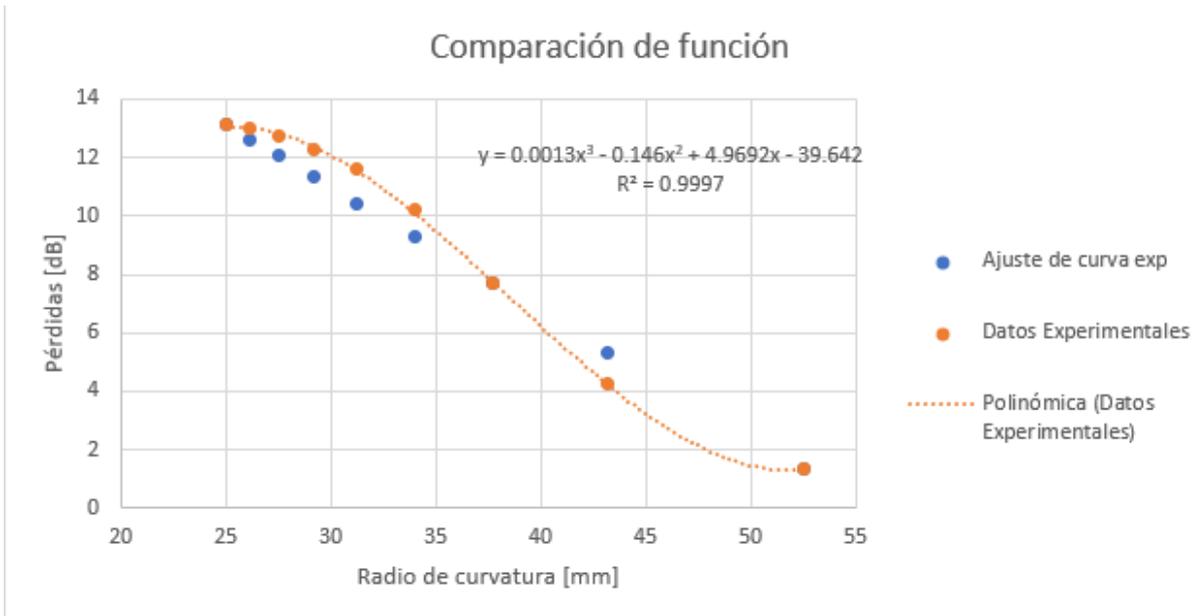


Figura A3.5. Muestra la gráfica de pérdidas vs radio de curvatura.

Para este sensor, las constantes características del ajuste exponencial son $C_1 = 3683.2975$ [dB], $C_2 = -0.0001158$ [1/mm] y $\beta = 3707.0986$ [dB]. El coeficiente de determinación resultante de la curva de ajuste exponencial fue de $R^2 = 0.9795$. La forma, las constantes características y el coeficiente de determinación de la curva de ajuste de tercer grado se logran apreciar en la figura A3.5.

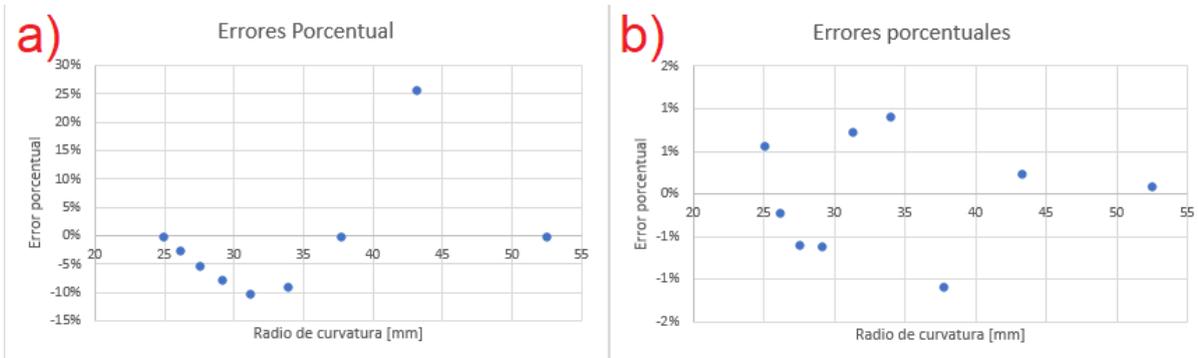


Figura A3.6. Muestra los errores porcentuales tomando como referencia la línea de tendencia. a) muestra los errores del ajuste exponencial, mientras que b) muestra los errores del ajuste del polinomio de tercer grado

Los errores porcentuales oscilaron entre el -10% y el 26%. A pesar de que los errores porcentuales en este sensor fueron mayores, el coeficiente de determinación nos indica que la línea de ajuste es muy parecida a los datos experimentales. Para el caso del ajuste polinómico de tercer grado, los errores oscilaron entre el -1% y el 1%.

Anexo 4

En esta sección se muestran las gráficas obtenidas de la superposición de las respuestas de los tres sensores ensayados bajo las mismas condiciones.

COMPRESIÓN

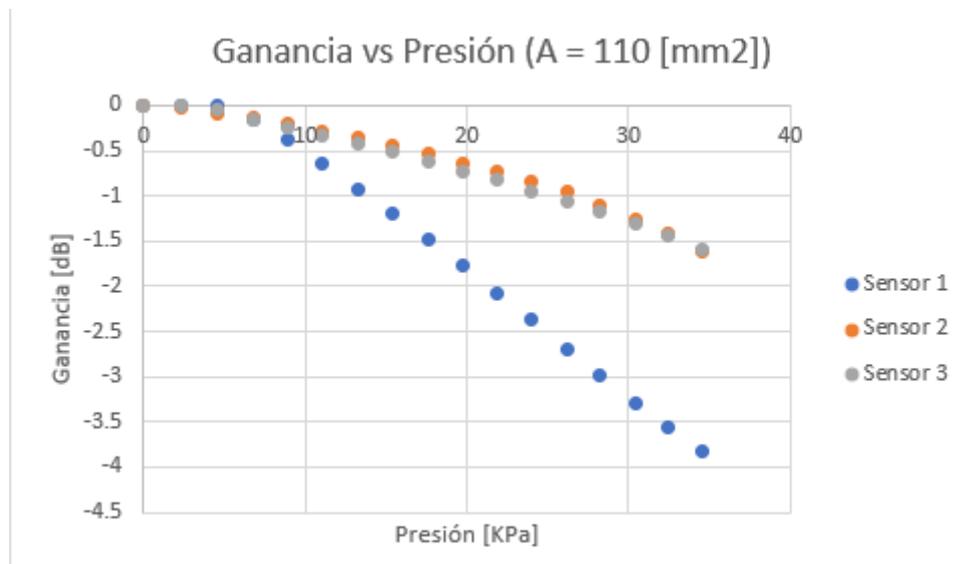


Figura A4.1. Muestra la superposición de las respuestas de los diferentes sensores sometidos a la prueba de compresión, con un área de 110 [mm²]

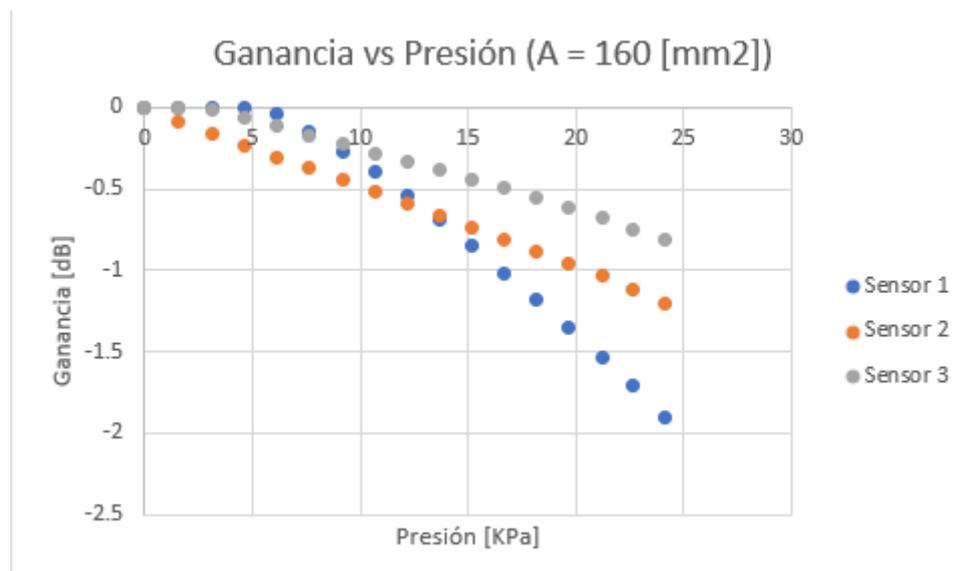


Figura A4.2. Muestra la superposición de las respuestas de los diferentes sensores sometidos a la prueba de compresión, con un área de 160 [mm²]

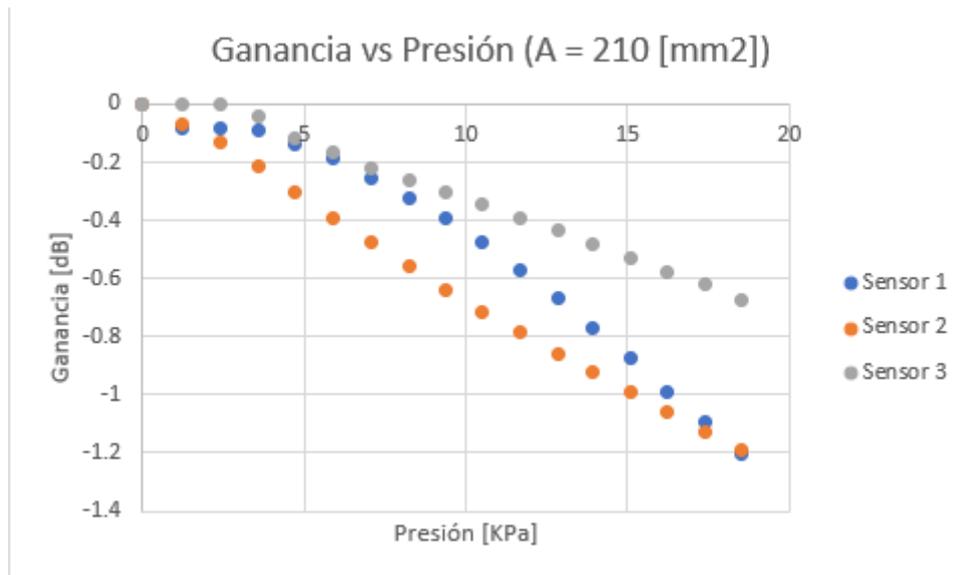


Figura A4.3. Muestra la superposición de las respuestas de los diferentes sensores sometidos a la prueba de compresión, con un área de 210 [mm²]

TRACCIÓN

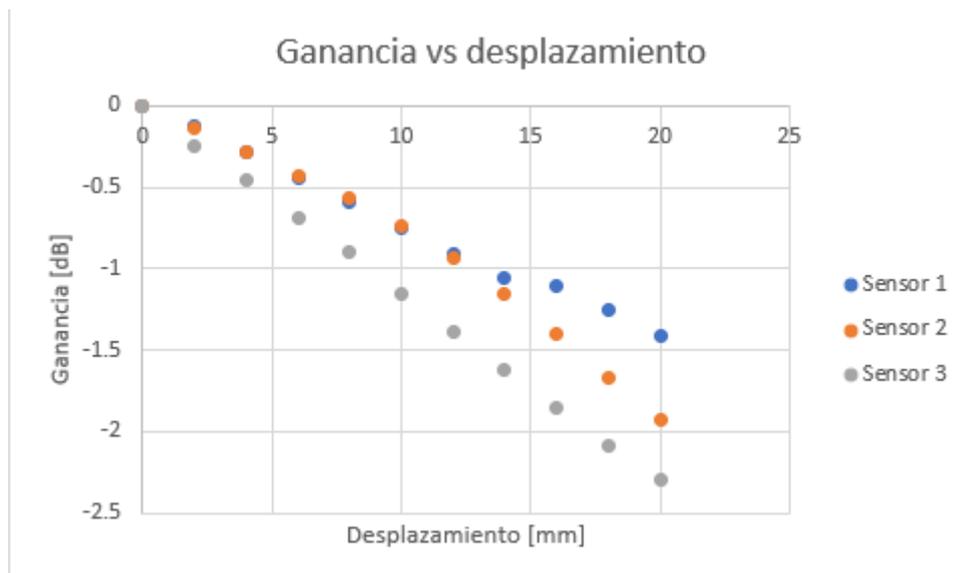


Figura A4.4. Muestra la superposición de las respuestas de los diferentes sensores sometidos a la prueba de tracción.

CURVATURA

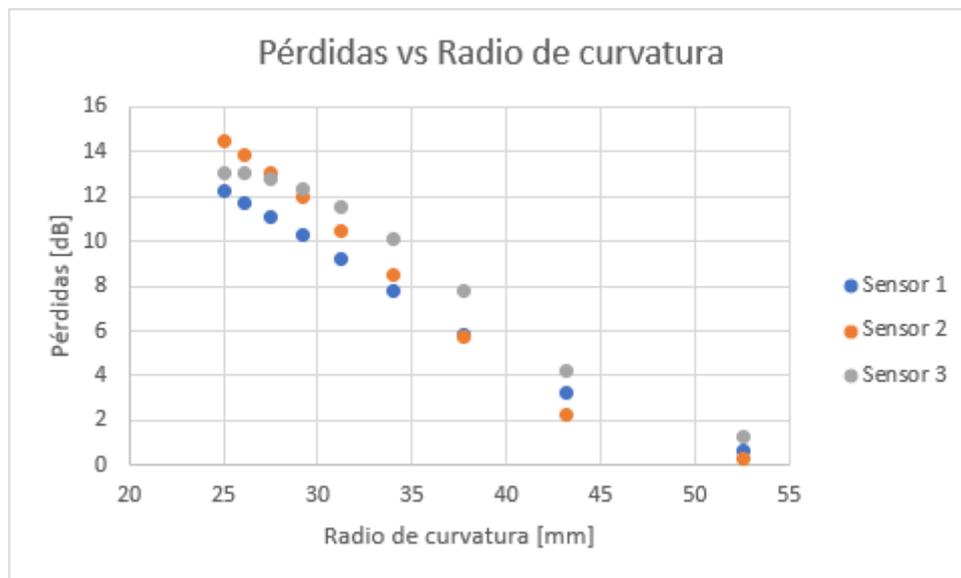


Figura A4.5. Muestra la superposición de las respuestas de los diferentes sensores sometidos a la prueba de curvatura.