



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

**DISEÑO, FABRICACION Y CARACTERIZACION DE SENSORES BLANDOS
MULTIESCALA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE INGENIERIA
MENCION MECANICA**

ALEXANDER ELISBAN RAQUI SANCHEZ

**PROFESOR GUIA:
JUAN CRISTÓBAL ZAGAL MONTEALEGRE**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA
VIVIANA MERUANE NARANJO**

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TITULO DE: Magister en Ciencia de la
Ingeniería Mención Mecánica.
POR: Alexander Elisban Raqui Sanchez
Fecha: 24/01/2018
PROFESOR GUIA: Juan Cristóbal Zagal**

DISEÑO, FABRICACION Y CARACTERIZACION DE SENSORES BLANDOS MULTIESCALA

En la actualidad la investigación sobre sensores blandos va en aumento por la creciente cantidad de publicación y prototipos que se han dado sobre el tema, por lo tanto, el objetivo de la tesis es diseñar, fabricar, entrenar y caracterizar un nuevo prototipo de sensor blando multiescala con forma de espiral que pueda sentir la magnitud de un estímulo de presión y permita conocer la ubicación del estímulo de presión dentro del área del sensor. Para que contribuya en el avance del campo de los sensores blandos y mejore la parte sensorial de los diferentes robots.

La idea principal de realizar este trabajo consistió en investigar la posibilidad de fabricar un sensor integrado que combine sensores de distinto tamaño, cada tamaño con rango de sensibilidad diferente, con una forma de pirámide gaussiana. Los análisis preliminares nos han permitido determinar que sensores de forma espiral de menor tamaño (8 mm de diámetro) presentan una mayor sensibilidad frente a pequeños estímulos de presión y también permiten mejorar la ubicación de la posición del estímulo. Esto último debido a la posibilidad de construir un arreglo matricial a partir de dichos sensores.

La tesis se inició con la recopilación y estudio de la bibliografía relacionada con el tema, luego se procedió con el diseño de moldes de los sensores, partes y accesorios del montaje experimental como por ejemplo diagrama del circuito de amplificación, luego se fabricó los sensores blandos aplicando la técnica de litografía blanda, mientras para la construcción del montaje experimental se hizo uso de algunas herramientas de fabricación digital que poseía la facultad, y finalmente realizar la caracterización con el método de redes neuronales [1].

El resultado que se obtuvo al finalizar los diferentes experimentos realizados en el laboratorio de robótica fue lograr construir un sensor blando multiescala de geometría espiral, que tiene la capacidad de poseer un amplio rango de acción para cualquier estímulo táctil enmarcado entre 3 y 100 kPa, y permita conocer el área de resolución espacial establecida en una matriz de 10 X 10, gracias a que se aplicó el método de redes neuronales, obteniendo un margen de error que oscila entre 0.01 y 4.2 mm en los diferentes puntos de la matriz.

Dedicatoria

El presente trabajo de tesis la dedico con toda mi atención y cariño a mi familia en especial a mi esposa Rosalín por su apoyo, comprensión, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre predominó el apoyo y cariño para finalizar este proyecto de vida trazado.

A mis amadas princesas Jackeline y Kiara que a pesar de su corta edad supieron sobrellevar todas las situaciones adversas y contribuyeron dándome esa tranquilidad y paz para continuar con esta odisea profesional que empecé, A mi querida madre Mercedes que siempre estuvo ayudándome en todos los aspectos, madre ejemplar que incansablemente día a día se preocupa por mis proyectos tanto personales como profesionales, con su forma particular de ser.

A mi familia, Padres, Hermanos, Tíos, Primos, Suegros y cuñados que radican en el Perú que desde mi arribo a Santiago de Chile siempre estuvieron pendiente desde mi inicio, avance y término de mis estudios en esta prestigiosa casa de Estudios.

Por lo antes mencionado a todas esas personas que, en algún determinado momento de mi corta estadía en Santiago de Chile, sin esperar nada a cambio me compartieron un momento de su tiempo donde nos intercambiamos conocimiento, alegrías y tristezas a sí mismo a las personas que estos dos años y medio me apoyaron desinteresadamente y contribuyeron para que este sueño se haga realidad.

Agradecimientos

Primeramente, debo estar agradecido con el Programa Nacional de Becas del Estado Peruano por la Beca internacional del cual he sido beneficiado y por ello culmine con esta maestría, Así mismo ser agradecido con Dios por colmarme de Bendiciones por hacerme madurar personal y profesionalmente y subir un peldaño más en mi formación profesional.

Agradezco También de manera especial a mi profesor Guía Dr. Juan Cristóbal Zagal Montealegre por su comprensión y tolerancia para insertarme en esta área de investigación y que tuvo a bien hacerme entender la importancia de este tema innovador que tuvo un reconocimiento especial en la comunidad científica peruana, y también a mis profesores co guías, Rubén Fernández y Viviana Meruane y a todos los muchachos del Laboratorio de Robótica del Departamento de Ingeniería Mecánica Edgardin, Juaco, Maxi, Efrén, Harold, Pablo y Dariel.

A sí mismo es justo agradecer también a todo el personal del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile Académicos, funcionarios, Personal Auxiliar, Ayudantes y estudiantes que desde mi llegada me hicieron sentir como en casa con una excelente acogida.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. <i>Objetivo General</i>	3
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.2.3. <i>Alcances y Limitaciones</i>	3
1.2.3.1. Alcances.....	3
1.2.3.2. Limitaciones.....	3
1.3. HIPÓTESIS PARA EL DISEÑO DEL SENSOR BLANDO	4
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES	5
2.1. ROBOTS BLANDOS	5
2.1.1. <i>Inteligencia</i>	5
2.1.2. <i>Actuadores</i>	6
2.2. SENSORES BLANDOS	8
2.3. MODELO MATEMÁTICO	9
2.4. SENSOR IDEAL DE PRESIÓN	10
2.5. REDES NEURONALES	13
2.6. LITOGRAFÍA BLANDA	14
2.6.1. <i>Polímero Eco Flex 00-30-</i>	15
2.6.2. <i>Líquido conductor metálico (galinstan)</i>	15
2.7. ESTADO DEL ARTE	16
2.7.1. <i>Diseño y fabricación de una piel artificial blanda con microcanales embebidos de líquido conductor</i>	17
2.7.2. <i>Interfaz deformable con redes neuronales profundas para táctil</i>	18
2.7.3. <i>Pieles electroluminiscentes elásticas para señalización óptica y detección táctil</i>	19
2.7.4. <i>Electrónica de carbono de silicio estirable para prótesis de piel</i>	20
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	22
3.1. DISEÑO DEL SENSOR BLANDO MULTIESCALA	22
3.2. FABRICACIÓN DEL SENSOR BLANDO MULTIESCALA	23
3.3. MATEMÁTICA Y MODELOS	24
CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL SENSOR	25
4.1. DISEÑO DEL SENSOR BLANDO	25
CAPÍTULO 5: FABRICACIÓN DEL SENSOR BLANDO	29
CAPÍTULO 6: CARACTERIZACIÓN Y RESULTADO	36
6.1. IMPLEMENTACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN EN LA IMPRESORA TOALA – PRINTER	37
6.2. DISEÑO, FABRICACIÓN, IMPLEMENTACIÓN DE LAS PIEZAS DE LA BALANZA	37
6.3. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ACCESORIOS DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	38
6.4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AMPLIFICACIÓN	40
6.4.1. <i>Diseño del diagrama del sistema de amplificación</i>	41
6.4.2. <i>Fabricación y construcción del circuito de amplificación de señal</i>	42
6.4.3. <i>Funcionamiento del sistema de amplificación de las señales</i>	45
6.5. ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL SENSOR BLANDO CON FORMA ESPIRAL	46
6.5.1. <i>Sistema de adquisición de datos</i>	46
6.5.2. <i>Funcionamiento del Instrumento de medición</i>	47
6.5.2.1. Pruebas de Presión Normal.....	47
6.5.2.2. Prueba de saturación del estímulo de Presión.....	48
6.5.2.3. Para pruebas con presiones constantes. (Bola omnidireccional).....	49
6.6. CARACTERIZACIÓN CON EL MÉTODO CONVENCIONAL DE ANÁLISIS DE DATOS	51
6.6.1. <i>Caracterización de la Presión con diferentes tipos de pulsadores de igual Área</i>	51
6.6.2. <i>Caracterización de la Presión con un pulsador circular a diferentes áreas</i>	53
6.6.3. <i>Caracterización del Desplazamiento del pulsador a presión Constante</i>	55
6.7. RESULTADO CON EL MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN CONVENCIONAL (VER FIGURA 60, 61,62)	55
6.8. CARACTERIZACIÓN CON EL MÉTODO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES	57
6.8. LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON NUESTRA RED NEURONAL ARTIFICIAL SON:	60

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....	64
BIBLIOGRAFÍA	65

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Valores del modelo matemático del sensor blando</i>	24
<i>Tabla 2. Consumo de Ecoflex 00-30 por sensor blando</i>	31
<i>Tabla 3 Características del circuito amplificador de 4 canales</i>	43
<i>Tabla 4. Características del circuito electrónico del sistema de amplificación</i>	44

Índice de ilustraciones

<i>Figura 1. Evolución de los robots blandos</i>	5
<i>Figura 2. Inteligencia artificial aplicada a los robots blandos</i>	6
<i>Figura 3. Tipos de actuadores que usan los robots blandos</i>	6
<i>Figura 4. Actuador eléctrico que utiliza el robot blando</i>	7
<i>Figura 5. Actuador neumático que utiliza el robot blando</i>	7
<i>Figura 6. Actuador hidráulico que utiliza el robot blando</i>	8
<i>Figura 7. Diferentes tipos de sensor blando</i>	9
<i>Figura 8. Representación y fórmula general de la resistencia del conductor</i>	9
<i>Figura 9. Modelo matemático del artículo científico</i>	10
<i>Figura 10. Fórmula de la pendiente para un sensor blando multiescala</i>	10
<i>Figura 11. Diagrama del comportamiento para un sensor blando multiescala ideal</i>	11
<i>Figura 12. Representación de la sensibilidad</i>	11
<i>Figura 13. Representación de la sensibilidad de presión del sensor</i>	12
<i>Figura 14. Representación de estado de saturación de una señal</i>	12
<i>Figura 15. Representación de la red Neuronal Artificial</i>	13
<i>Figura 16. Diferentes Métodos de litografía blanda</i>	14
<i>Figura 17. Representación del molde de un polímero</i>	15
<i>Figura 18. Uso del líquido conductor metálico</i>	15
<i>Figura 19. Referencia del eje del Sensor</i>	16
<i>Figura 20. Piel artificial blanda con microcanales embebidos de líquido conductor</i>	18
<i>Figura 21. Representación del control del OrbTouch</i>	19
<i>Figura 22. Funcionamiento de las pieles electroluminiscentes elásticas</i>	20
<i>Figura 23. Representación del funcionamiento de la electrónica de carbono de silicio estirable.</i>	21
<i>Figura 24. Esquema de metodología para el diseño del sensor</i>	22
<i>Figura 25. Esquema de la metodología para la fabricación del sensor</i>	23
<i>Figura 26. Modelo matemático del sensor blando</i>	24
<i>Figura 27. Diseño del Sensor grande</i>	26
<i>Figura 28. Diseño del sensor mediano</i>	27
<i>Figura 29. Diseño del sensor pequeño</i>	28
<i>Figura 30. Proceso de fabricación del sensor blando multiescala</i>	30
<i>Figura 31. Proceso de mezcla de las componentes A y B.</i>	31
<i>Figura 32. Desgasificación de la mezcla en la cámara de vacío</i>	32
<i>Figura 33. Tratamiento de curado</i>	32
<i>Figura 34. Armado y pegado del sensor</i>	33
<i>Figura 35. Verificación de la integridad de los canales</i>	33
<i>Figura 36. Embebido de líquido conductor metálico</i>	34
<i>Figura 37. Colocación y fijación de los cables terminales</i>	34
<i>Figura 38. Verificación de la continuidad entre terminales</i>	34
<i>Figura 39 Sensor blando multiescala</i>	35
<i>Figura 40. Implementación de la balanza en el instrumento de medición</i>	37
<i>Figura 41. Partes de la balanza del instrumento de medición</i>	38
<i>Figura 42. Accesorios del instrumento de medición.</i>	40
<i>Figura 43. Imágenes de los circuitos de amplificación del Montaje Experimental.</i>	41
<i>Figura 44. Esquema del circuito electrónico de amplificación</i>	42
<i>Figura 45. Prototipo del circuito electrónico de cuatro (04) canales del sistema de amplificación</i>	43
<i>Figura 46. Construcción del prototipo final del circuito electrónico del sistema de amplificación.</i>	45
<i>Figura 47. Sistema de amplificación de la señal</i>	46
<i>Figura 48. Esquema del proceso de adquisición de datos</i>	47
<i>Figura 49. Estímulo de presión convencional</i>	48
<i>Figura 50. Prueba de saturación del sensor</i>	48
<i>Figura 51. Prueba para estímulo con presión constante</i>	50

<i>Figura 52. Prueba de entrenamiento de una red neuronal.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 53. Prueba de presión sobre el diámetro horizontal del sensor</i>	<i>51</i>
<i>Figura 54. Prueba para encontrar el rango de presión máxima</i>	<i>51</i>
<i>Figura 55. Prueba de presión con diferente forma geométrica de la punta del pulsador.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 56. Prueba de presión sobre el diámetro horizontal con un pulsador circular de 9mm</i>	<i>53</i>
<i>Figura 57. Prueba para encontrar el rango de presión máxima con pulsador circular de 9mm</i>	<i>53</i>
<i>Figura 58. Prueba de presión en el centro del sensor con 10 repeticiones con diferentes áreas del pulsador circular.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 59. Prueba del pulsador a presión constante (bola omnidireccional)</i>	<i>55</i>
<i>Figura 60. Amplitud vs Presión, de la curva de histéresis, para los sensores pequeños</i>	<i>55</i>
<i>Figura 61. Amplitud vs Presión, de la curva de histéresis, para los sensores medianos.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 62. Amplitud vs Presión, de la curva de histéresis, para los 3 tamaños de sensores.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 67. Proceso del análisis de datos de una rutina de red neuronal artificial evaluada a 6500 segundos con 200 pulsaciones.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 63. Esquema de red neuronal para rango de presión</i>	<i>58</i>
<i>Figura 64. Esquema de red neuronal para ubicación del estímulo de presión</i>	<i>59</i>
<i>Figura 65. Resultado de la red neuronal para el rango de presión</i>	<i>59</i>
<i>Figura 66. Resultado de la red neuronal para el estímulo de presión</i>	<i>60</i>
<i>Figura 68. Error cuadrático medio. Output (línea negra) vs Resultado del entrenamiento (puntos azules).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 69. Validación del entrenamiento de la red neuronal.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 70. Saturación del sensor integrado</i>	<i>62</i>
<i>Figura 71. Imagen ampliada del primer grafico de saturación</i>	<i>62</i>
<i>Figura 72. Área de resolución del sensor blando multiescala</i>	<i>63</i>

Capítulo 1: Introducción

La robótica blanda es un nuevo sub campo de la Robótica, que trata de la construcción de robots con materiales altamente deformable, similares a los que se encuentran en los organismos vivos, de ello nace la motivación de crear nuevos sensores blandos multiescala, con posibilidades de ampliar el rango de presión y mejorar la resolución espacial de los sensores, para contribuir con la inteligencia de los robots blandos [2] [3] [4]

El fundamento que motivo la presente tesis se sustenta en explorar un nuevo tipo de sensor blando multiescala que tenga la capacidad de transformar un estímulo mecánico a señal eléctrica por medio de un estímulo de presión, En vista que en la actualidad existen tecnologías parecidas, a nuestro sensor, como la piel artificial blanda [4] [5] [6] [7] [8] y Orb Touch [9]

El objetivo de la presente tesis se enmarca en diseñar, fabricar y caracterizar los mencionados sensores blandos [10] [11], teniendo dos etapas para este proceso, que son la construcción del Setup experimental y el Análisis del Sensor, hasta la obtención de los resultados.

La hipótesis de esta tesis, es generar un sensor integrado, que posea un amplio rango de sensibilidad al combinar las distintas capas, y tenga la capacidad de tener una resolución espacial, que apoyados con un método de redes neuronales artificiales [12]. Nos dé resultados certeros sobre el rango de presión y ubicación del estímulo. [13]

La metodología empleada en esta tesis consistió en analizar la revisión bibliográfica, crear el diseño de los sensores blandos con criterios basados en la referencia bibliográfica y construir el setup experimental para que ayude a obtener los datos, para su análisis y posteriormente obtener su resultado.

1.1. Motivación

Se han desarrollado sensores blandos de presión [14] [15] [6] basados en producir microcanales [7] [14] [16] de material líquido conductor [17] embebidos en el interior de láminas de silicona blanda. Al ser completamente blandos estos sensores tienen el potencial de ser aplicados en la forma de piel artificial [5] [7] [8]. Podrían servir como un complemento a la piel dañada de personas e incluso podrían ser de utilidad a nuevos robots que puedan interactuar en forma más efectiva con su entorno.

El desarrollo de estos sensores también podría implicar un impacto en la generación de nuevos mecanismos para la manipulación de objetos delicados.

Estos sensores de presión [7] se basan en la geometría de un espiral, dado que se ha observado que dicha geometría permite maximizar el efecto de estrangulamiento que sufren los microcanales cuando se aplica una carga mecánica sobre una lámina de silicona. En la literatura se han reportado sensores del tipo espiral de 25 mm de diámetro los cuales permiten caracterizar la presión ejercida sobre dicha superficie bajo un rango que va de los 15kPa hasta los 40kPa.

La idea de este trabajo consiste en explorar la posibilidad de generar un sensor integrado que combine sensores de distinto tamaño en una especie de sándwich. Observaciones preliminares nos han permitido establecer que sensores del tipo espiral de menor tamaño (del orden de 8 mm de diámetro) presentan una mayor sensibilidad frente a estímulos pequeños de presión y también tienen el potencial de permitir mejorar la ubicación de la posición del estímulo. Esto último debido a la posibilidad de construir un arreglo matricial a partir de dichos sensores. No obstante, los sensores pequeños tienen una saturación temprana frente a estímulos de presión mayores.

Luego pretendemos explorar la posibilidad de extraer la información de distintas capas sensoriales, donde una última capa posea 16 sensores pequeños, aportando con sensibilidad frente a presiones bajas y con mayor información en cuanto a la posición del estímulo. Luego una capa intermedia puede continuar aportando información sobre presiones intermedias, aunque con menor resolución espacial y finalmente la primera capa podría sentir altas presiones con un grado menor de resolución espacial.

Además, esta idea es consistente con la distribución laminar de diversos sensores en los seres vivos. En el caso de la visión, por ejemplo, existen foto sensores que integran información de un extenso campo visual, mientras otros son más focalizados. En el caso del tacto, los mecanos receptores, también tienen una distribución laminar, algunos sensibles a la presión, pero con baja resolución espacial y otros con un campo de acción reducido, pero sensibles a la presión y con alta resolución espacial.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Diseñar, fabricar, entrenar y caracterizar un sensor blando multiescala con forma de espiral que pueda sensar la magnitud de un estímulo de presión y ubicación del estímulo de presión dentro del área del sensor, que tenga un mejor desempeño que un sensor blando independiente

1.2.2. Objetivos Específicos

- Crear un sistema o procedimiento que permita fabricar micro canales en el interior de láminas blandas
- Construir una plataforma de caracterización de los sensores blandos que permita medir variaciones de resistencia eléctrica en función de distintos estímulos mecánicos.
- Definir los modelos matemáticos que gobiernan el comportamiento del sistema, que expliquen el cambio de la resistencia en las distintas capas del sensor multicapa.
- Caracterizar el desempeño del sensor
- Crear una herramienta de visualización que permita medir la magnitud de presión y ubicación en el plano de un estímulo de presión.

1.2.3. Alcances y Limitaciones

1.2.3.1. Alcances.

Los alcances del presente trabajo son:

- Diseñar, fabricar y caracterizar sensores blandos.
- Construir un montaje experimental para el análisis de los sensores blandos.
- Crear un sensor blando que tenga la capacidad de sensar un alto rango de presión y mejorar la resolución espacial.
- Realizar rutinas de entrenamientos para redes neuronales [1] para determinar el rango de presión y resolución espacial del sensor.
- Utilizar el área la resolución espacial del sensor para generar diferentes formas (letras o números) a una presión constante.

1.2.3.2. Limitaciones.

Las limitaciones que presenta el sensor blando multicapa, son:

- Las utilizations de los sensores poseen un tiempo de vida recomendable, que soporta 3000 pulsaciones aproximadamente antes de que empiece a deteriorarse y salga el galinstan por los diferentes terminales y cambie su configuración.

1.3. Hipótesis para el diseño del sensor blando

- H1. Es posible generar un sensor integrado que posea un amplio rango de sensibilidad al combinar distintas capas de sensores. El sensor integrado no debe saturarse en el rango de operación global y debe poseer una alta sensibilidad en el caso de las presiones bajas.
- H2. Es posible construir un sensor de resolución espacial igual o superior a la resolución espacial de la capa de mayor resolución.
- H3. Es posible construir una red neuronal artificial que entregue valores apropiados de presión y ubicación de distintos estímulos gracias al uso de entrenamiento.

Capítulo 2: Antecedentes

2.1. Robots Blandos

Una nueva ola de robots basados en diseños biológicos [2] [18], son capaces de realizar tareas que no están al alcance de las extremidades rígidas de los robots tradicionales, Esta robótica blanda nace para suplir las carencias de los robots rígidos o tradicionales que se mueven gracias a articulaciones y extremidades, siguiendo una serie de instrucciones muy concretas.

La robótica blanda es nueva generación de robots, que tendrán formas tan dispares como los seres vivos, dichos robots no solo están fabricados con materiales altamente deformables y flexibles, sino también poseen muchas estructuras biológicas, que funcionan gracias a un sistema de microcanales construidos aplicando la técnica de litografía blanda.

Estos microcanales [16] [19] [16] trabajan con algún tipo de fluido a una determinada presión, y así estimular al robot para realizar una actividad determinada, donde el estímulo lo podemos controlar por medio de los diferentes lenguajes de programación. [20] Y apoyados con algún componente electrónico (*Ver Figura 1*).

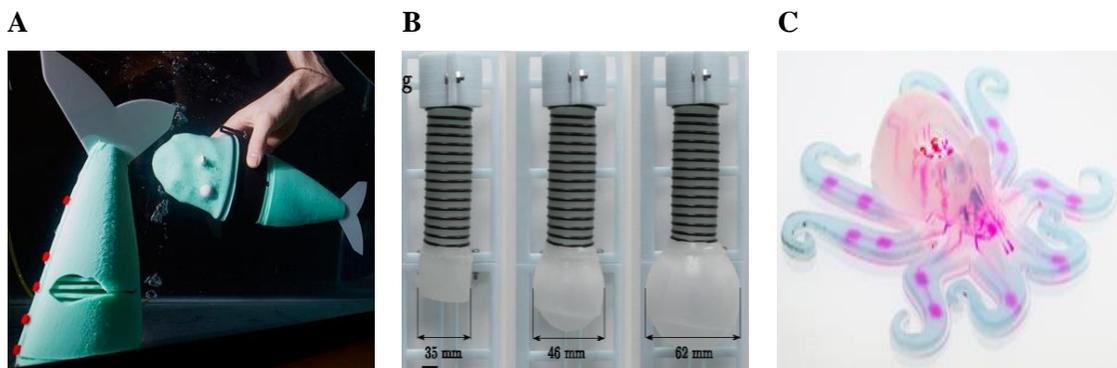


Figura 1. Evolución de los robots blandos

En A se aprecia un robot blando que asemeja la fisonomía de un pez, en B tenemos un robot gusano que posee la capacidad de avanzar gracias a la actividad de contraerse por un “resorte” en su parte central y, en C, se tiene el robot blando Octobot el primer robot blando autónomo

2.1.1. Inteligencia

La inteligencia en este ámbito de investigación se basa principalmente en controlar los actuadores blandos [21], que se utilizan para controlar su cinemática, las fuerzas de interacción con los objetos en el entorno, y la presión interna. Lo cual se logra mediante el uso de sensores completamente blandos y sensores en miniatura o flexibles que se pueden incorporar al diseño del actuador durante el proceso de fabricación. Para la potencia y el control, usamos componentes fuera de la plataforma como válvulas electrónicas, bombas, reguladores, sensores y tableros de control, etc. para modular rápidamente la presión dentro de las cámaras de los actuadores mediante el control de la presión, el movimiento y la fuerza, para lo cual, además, podemos usar los modelos

analíticos open source para desarrollar variables de estado que pueden ser difíciles de medir directamente. (Ver Figura 2).

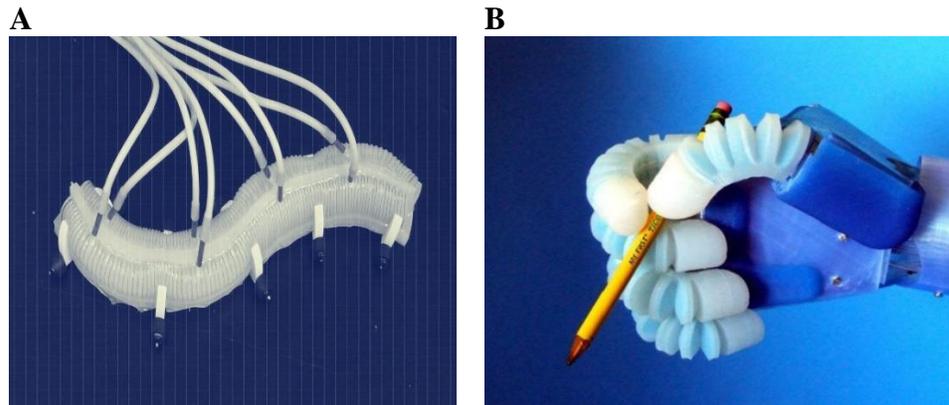


Figura 2. Inteligencia artificial aplicada a los robots blandos
En A se observa una oruga que logra moverse mediante un actuador neumático y en B, una prótesis de mano impreso en 3D acoplados con 5 dedos flexibles de polímero elastómero que actúan por medio de un actuador neumático.

2.1.2. Actuadores

El actuador [22] es considerado un elemento capaz de transformar algún tipo de energía (eléctrica, neumática e hidráulica) en una salida generalmente mecánica que puede provocar un movimiento, de un proceso automatizado. Estos dispositivos acompañados de elementos de procesamiento de información o control, dan la capacidad al robot blando que realice diferentes tipos de movimientos o acciones y ayudan a desarrollar la inteligencia del robot blando. (Ver Figura 3).

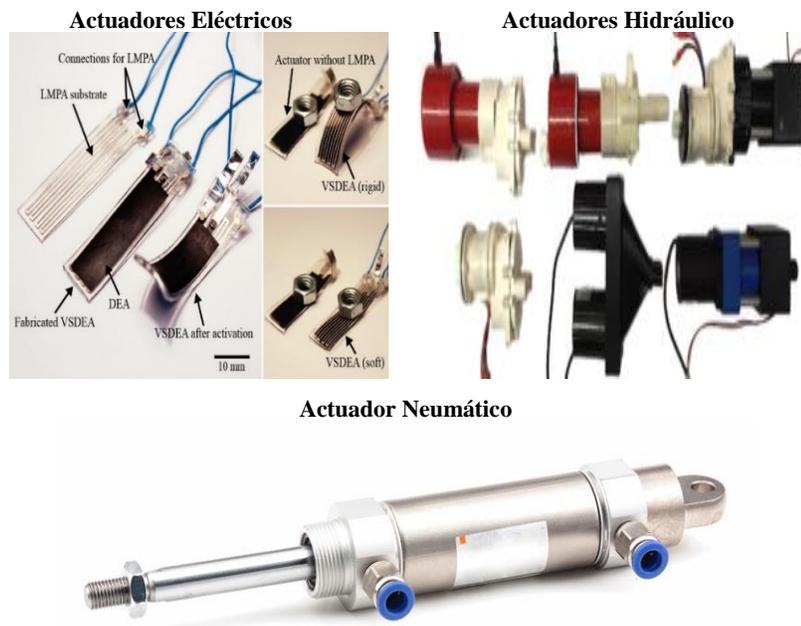


Figura 3. Tipos de actuadores que usan los robots blandos

- **Actuadores eléctricos blandos**

La importancia de los actuadores eléctricos en el campo de la robótica blanda es necesaria por la simplicidad de su uso, la composición de un actuador eléctrico es simple en comparación con la de los actuadores hidráulicos y neumáticos, ya que sólo requieren de energía eléctrica como fuente de energía. Como se utilizan cables eléctricos para transmitir electricidad y las señales, por lo tanto, es altamente versátil, y prácticamente no hay restricciones al respecto sobre la distancia entre la fuente de energía y el actuador, para lo cual existen dos tipos de actuadores, que es polímero eléctricamente activo y aleaciones metálicas con memoria (*Ver Figura 4*).

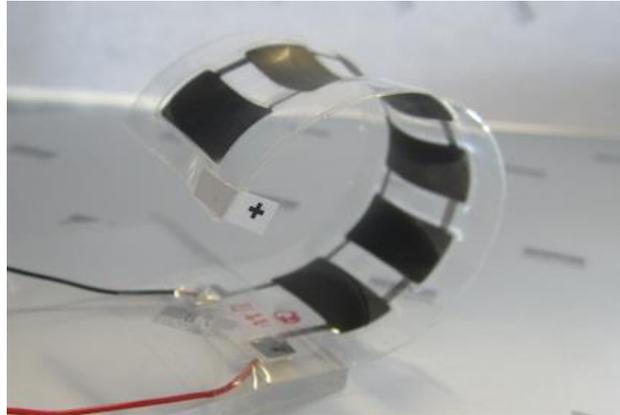


Figura 4. Actuador eléctrico que utiliza el robot blando

- **Actuadores Neumáticos blandos**

El uso de los actuadores neumáticos para la robótica blanda es común, ya que son mecanismos que convierten la energía de aire comprimido en trabajo mecánico necesarios para estimular movimientos en los robots blandos [4] [4], donde su rango de compresión en este caso es menor al de un actuador hidráulico, es por ello que la factibilidad de este dispositivo para generar diversos movimientos en robots modulares es ideal. (*Ver Figura 5*).

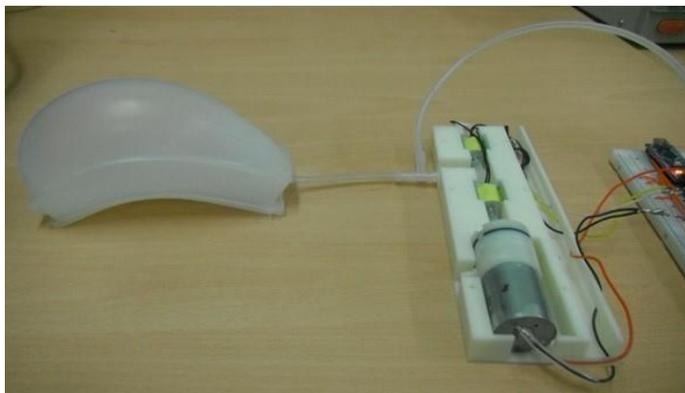


Figura 5. Actuador neumático que utiliza el robot blando

- **Actuadores Hidráulicos blandos**

Los actuadores hidráulicos, son los de mayor antigüedad y poseen mucha potencia de presión en su empleo, estos actuadores son clasificados de acuerdo con la forma de operación, y funcionan sobre la base de fluidos a presión. De las cuales existen tres grupos que son, el cilindro hidráulico, motor hidráulico y motor hidráulico de oscilación.

Por lo general, este tipo de actuadores se emplean cuando se necesita mucha potencia, y por tal motivo requieren mucho equipo para suministro de energía, así como el mantenimiento periódico para mantener su operatividad (ver figura 6).

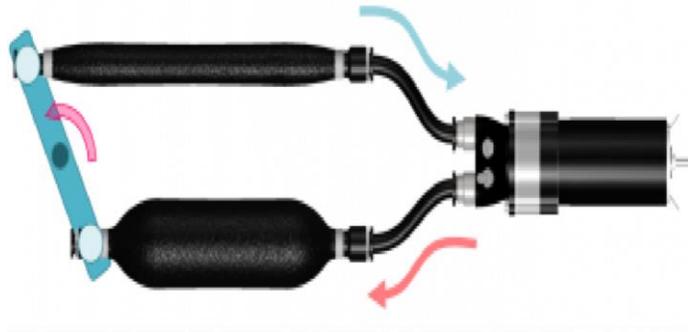


Figura 6. Actuador hidráulico que utiliza el robot blando

2.2. Sensores Blandos

Una de las áreas de la robótica blanda, es la piel electrónica flexible y elástica [23]. La historia, el presente y el futuro potencial de la piel electrónica se han revisado detenidamente en la actualidad. La piel electrónica también debe ser elástica. Muchos grupos de investigación concentraron su trabajo en las capacidades de detección táctil de nuestra piel, pero la piel tiene muchas más funciones que nos ayudan a responder adecuadamente a los entornos de forma impredecible. Aunque la electrónica extensible y los sensores blandos son campos de investigación bastante nuevos, ya hay muchas revisiones disponibles, Ahora veremos brevemente el desarrollo en el campo de los robots blandos. [4]

La característica principal de los sensores blandos [24] [25] [8], consiste en utilizar metal líquido conductor (aleación [17] eutéctica de indio de galio), también conocido como (EGaIn) dentro de microcanales flexibles. Cuando se estira, la geometría de los canales cambia y se produce un cambio de resistencia. Al medir el cambio en la resistencia, es posible calcular la tensión (o la cantidad de estiramiento).

Otra característica tiene que ver con la creación de estos dispositivos blandos, los cuales se fabrican ocupando la técnica de litografía blanda, por la construcción de geometrías complejas en las láminas de silicón en forma de microcanales. (Ver Figura 7).

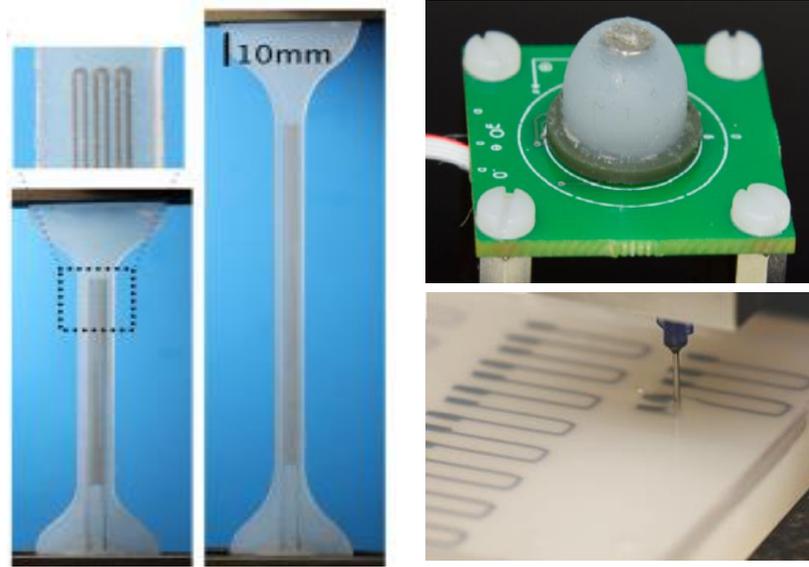
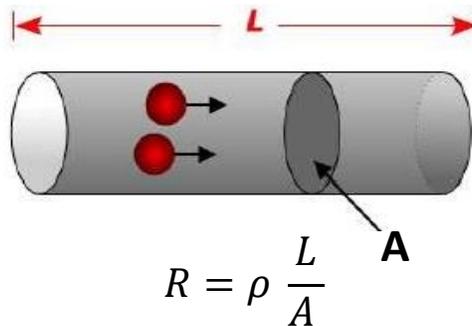


Figura 7. Diferentes tipos de sensor blando

2.3. Modelo Matemático

La aplicación del modelo matemático que se sostiene en el artículo científico [6] se basó fundamentalmente en una Ecuación de la Resistencia de un conductor, teniendo en consideración el diámetro y la longitud del microcanal con su respectivo valor a su resistividad del material analizado. (Ver Figura 8).



$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{donde:}$$

R = Resistencia eléctrica de un conductor
 L = Longitud del conductor
 A = Área del Cuerpo de conductor.
 ρ = Resistividad del Material

Figura 8. Representación y fórmula general de la resistencia del conductor

Como antecedente del sensor blando del artículo científico el sensor por medio de un estímulo táctil (deformación), produce un estrangulamiento de los microcanales [16] [19] del sensor los cuales nos originan una variación de resistencia medible, que nos ayuda a predecir el estímulo de presión, el cual se puede modelar teóricamente y para tal caso se compararon el resultado teórico con el experimental.

Por lo tanto, en el artículo científico considero otra nomenclatura similar pero ampliada, implementando una fórmula que incluía todos los factores propios de sensor como la longitud del ancho y alto de los microcanales, la relación de poissón del material elastómero, el modulo elástico del polímero y la presión externa al que es sometido el sensor. El cual nos da como

resultado la variación de resistencia de nuestro sensor blando como se demuestra en la siguiente formula: (Ver Figura 9).

$$\Delta R = \frac{\rho L}{wh} \left(\frac{1}{1 - 2(1 - \nu^2)wP/Eh} - 1 \right)$$

ΔR : Variación de la resistencia del micro canal.
 ν : Relación de Poisson del material elastómero.
 L : Longitud de los micro canales.
 ρ : Resistividad eléctrica del Galinstan.
 w : Longitud del ancho del micro canal.
 h : Longitud del alto del micro canal.
 E : Modulo elástico del Polímero.
 P : Presión externa.

Figura 9. Modelo matemático del artículo científico

2.4. Sensor Ideal de Presión

Teniendo como antecedentes las diferentes publicaciones relacionadas a pieles artificiales o sensores táctiles [26] [27] [9] [6] [15], se puede asumir que la forma geométrica de espiral es la más adecuada para este tipo de estímulo. Y esto sucede por la concentración de la resistencia en el centro del diámetro del sensor. Las características fundamentales para la creación de un sensor ideal de presión, debe tener como principio de la función Lineal, la superposición y homogeneidad, factores que nos facilitaran la predicción de los valores del rango de presión de nuestro sensor ideal. (Ver Figura 10).

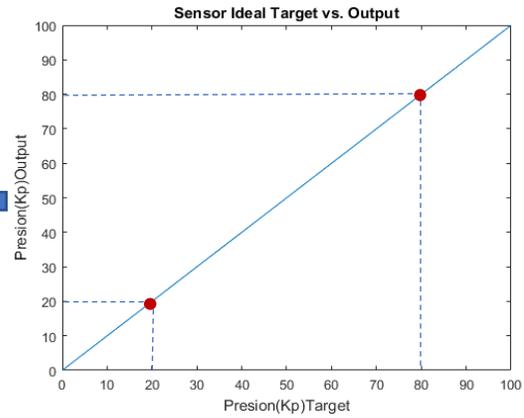
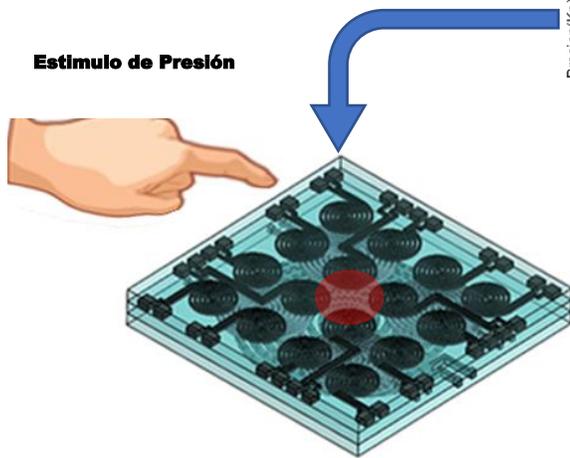
$$y = mx + b$$

y : Punto en el eje Y
 x : Punto en el eje X.
 b : Constante real
 m : pendiente de la Recta

Figura 10. Fórmula de la pendiente para un sensor blando multiescala

La propiedad de la linealidad de un sistema que describe una relación lineal entre causa y efecto, Esta propiedad es una combinación de la propiedad de homogeneidad(escalonamiento) y la propiedad aditiva. es la fórmula de la función lineal conocida, como la ecuación de la recta en el plano x, y en el contexto del algebra Lineal. (Ver Figura 11).

Comportamiento de un Sensor Ideal



Modelo Lineal
 $y = mx + b$

Figura 11. Diagrama del comportamiento para un sensor blando multiescala ideal

El resultado esperado que debe tener nuestro sensor blando ideal es poseer un amplio rango de sensibilidad ante un estímulo táctil, y poseer una mayor de resolución espacial, para la ubicación del estímulo. Independiente a su número de capas y el orden en que este ubicado, por lo tanto, procederemos a explicar conceptos básicos sobre nuestro sensor blando.

Concepto de Sensibilidad. - Se entiende por sensibilidad a aquella capacidad propia e inherente a cualquier ser vivo de percibir sensaciones, de responder a pequeños estímulos. (Ver Figura 12).

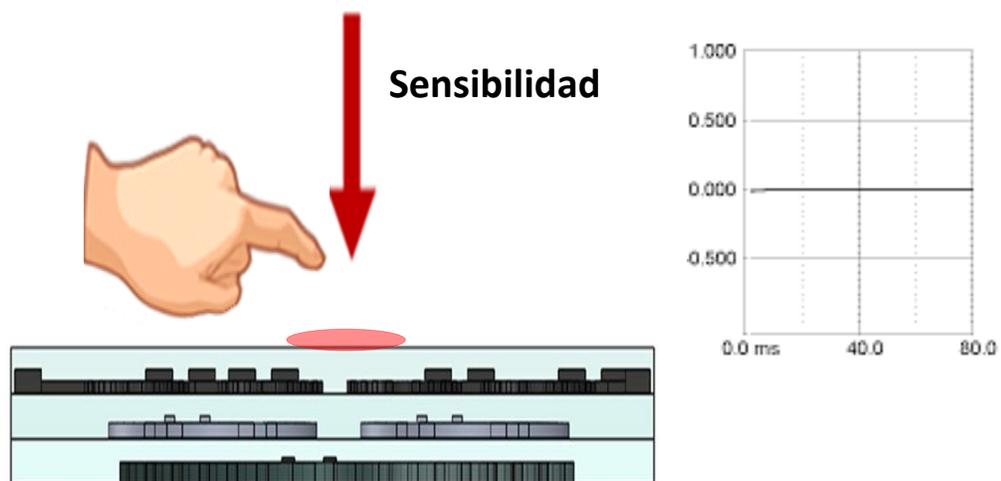


Figura 12. Representación de la sensibilidad

Sensibilidad del Sensor. - La sensibilidad del sensor blando multiescala no se despierta por el contacto sobre el sensor, a diferencia de la sensibilidad de presión que, si despierta sensibilidad, por que basta una ligera deformación del sensor para que se estimule y obtenga un valor de presión. (Ver Figura 13).

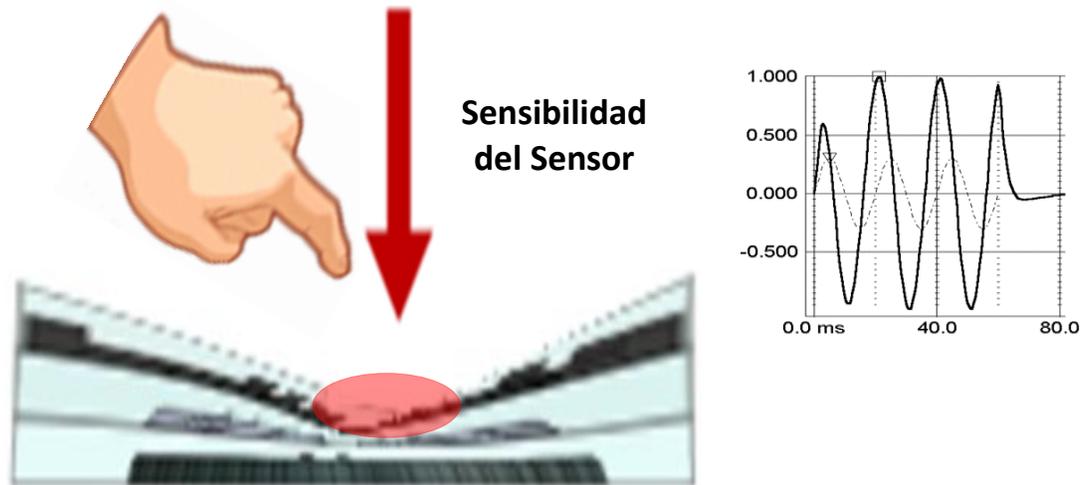


Figura 13. Representación de la sensibilidad de presión del sensor

Saturación. - El estado de saturación sucede cuando la corriente e base alcanza valores muy altos hasta el punto donde la señal no discrimina más valores. En electrónica analógica se utiliza el estado activo, mientras que los estados de saturación y corte son útiles para la electrónica digital, ya que representan los dos estados fundamentales: Abierto y cerrado (1 y 0). (ver figura 14).

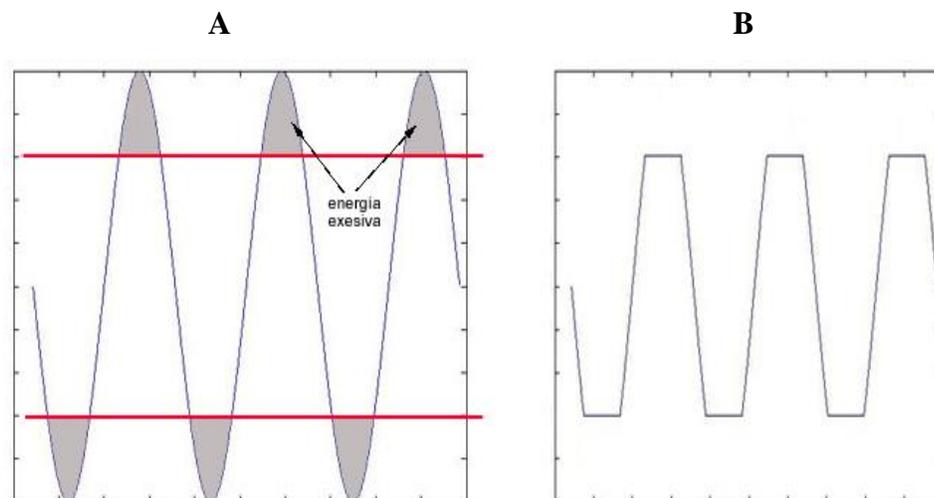


Figura 14. Representación de estado de saturación de una señal
En A se aprecia la señal real delimitada por los rangos de saturación (líneas rojas) y en B, la señal ya limitada

2.5. Redes Neuronales

Las redes neuronales [1] [8] [20] [3] (también conocidas como sistemas conexionistas) son un modelo computacional basado en un gran conjunto de unidades neuronales simples (neuronas artificiales). Cada unidad neuronal, de forma individual, opera empleando funciones de suma. Puede existir una función limitadora en cada conexión y en la propia unidad. Estos sistemas aprenden y se forman a sí mismos, en lugar de ser programados de forma explícita, y sobresalen en áreas donde la detección de soluciones o características es difícil de expresar con la programación convencional.

Las redes neuronales [1] [3] suelen consistir en varias capas, y la ruta de la señal atraviesa de adelante hacia atrás. Las Redes Neuronales son un campo muy importante dentro de la Inteligencia Artificial. Inspirándose en el comportamiento conocido del cerebro humano (principalmente el referido a las neuronas y sus conexiones), trata de crear modelos artificiales que solucionen problemas difíciles de resolver mediante técnicas algorítmicas convencionales.

El objetivo de la red neuronal es resolver los problemas de la misma manera que el cerebro humano, aunque las redes neuronales son más abstractas. Los proyectos de redes neurales modernas suelen trabajar desde unos miles a unos pocos millones de unidades neuronales y millones de conexiones que, si bien son muchas órdenes, siguen siendo de una magnitud menos compleja que la del cerebro humano. (Ver Figura 15)

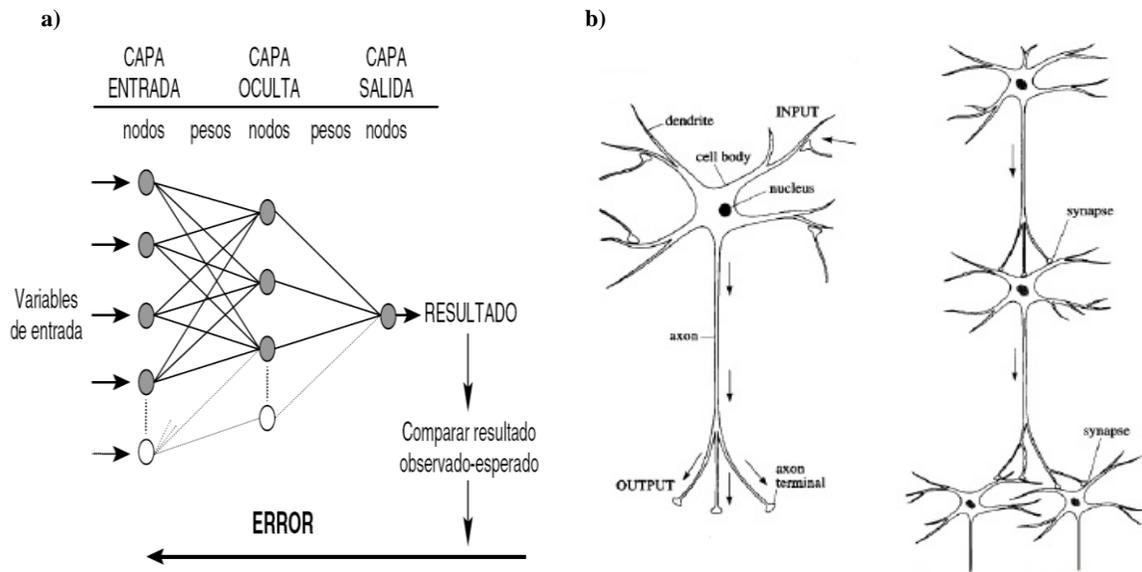


Figura 15. Representación de la red Neuronal Artificial

a) Esquema general de una red neuronal artificial, b) Sistema de funcionamiento de una neurona.

2.6. Litografía Blanda.

La litografía blanda [24] [14] representa una estrategia no fotolitográfica basada en el auto ensamblaje y el moldeo de réplicas para realizar micro y nano fabricación de canales. Proporciona un método conveniente, efectivo y de bajo costo para la formación y fabricación de micro y nano estructuras. En materiales blandos, se usa un sello elastomérico con estructuras de relieves estampadas en su superficie para generar patrones y estructuras con tamaños de características que van desde 30nm hasta 100 μ m. Se han demostrado cinco técnicas: impresión de micro contacto (μ CP), moldeo de réplica (REM), moldeo por micro transferencia (μ TM), micro moldeo en capilares (MIMIC) y micro moldeo asistido por disolvente (SAMIM). Los procedimientos para estas técnicas y sus aplicaciones en micro y nano fabricación, ciencia de materiales, óptica, MEMS y microelectrónica son aplicables en esta nueva área de la robótica blanda.

Las técnicas litográficas Blanda exploradas en el presente artículo y las técnicas no fotolitográficas desarrolladas en otros grupos ofrecen ventajas inmediatas en una serie de aplicaciones como el modelado en escala <100nm, en superficies no planas, en materiales sólidos distintos de la foto resistencias, en materiales líquidos, en funcionalidades superficiales, en áreas extensas y formación en tres dimensiones y en microestructuras y sistemas, por ejemplo: (Ver Figura 16).

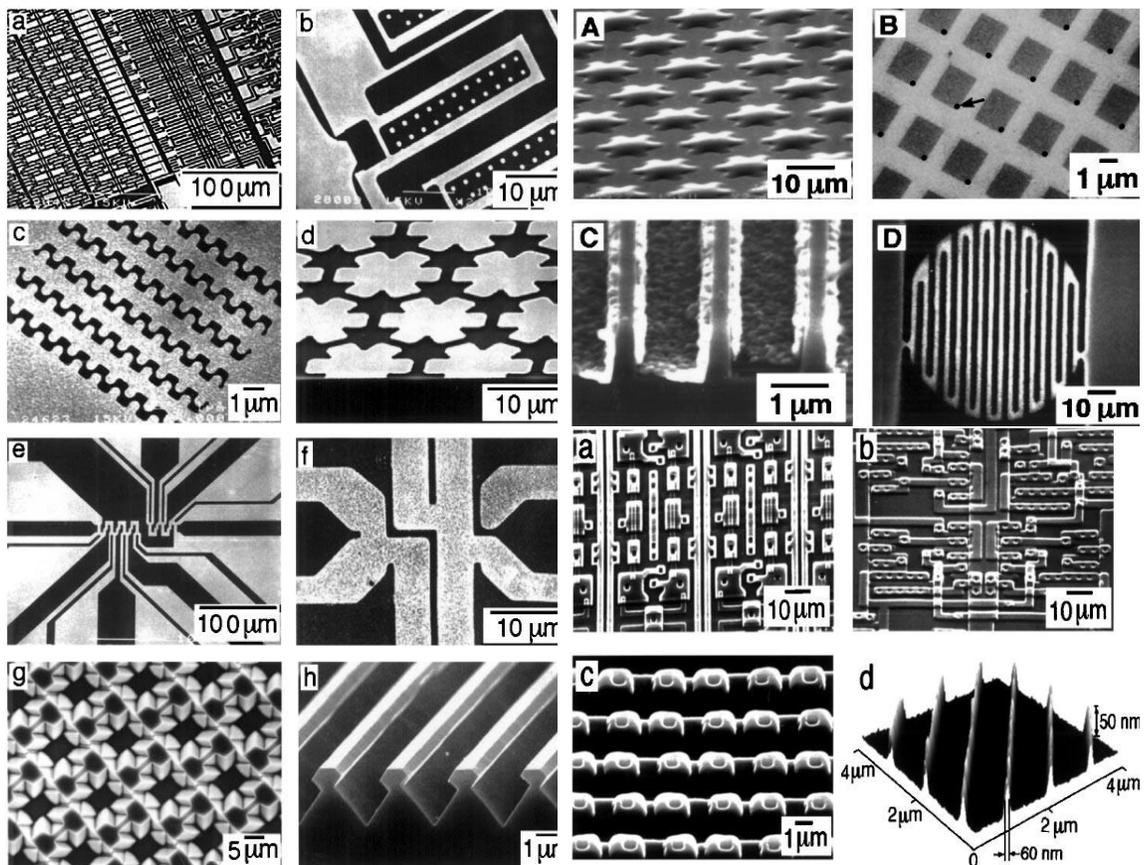


Figura 16. Diferentes Métodos de litografía blanda

2.6.1. Polímero Eco Flex 00-30.-

La silicona Ecoflex son siliconas catalizadas con platino que son versátiles y fáciles de usar. La silicona Ecoflex se mezclan 1A: 1B en peso o volumen y se curan a temperatura ambiente con una contracción insignificante. La baja viscosidad asegura una fácil mezcla y eliminación de aire. La silicona curada es muy suave, muy fuerte y muy elástica, se estira muchas veces más que su tamaño original sin romperse y regresa a su forma original sin distorsión. (Ver Figura 17).



Figura 17. Representación del molde de un polímero

2.6.2. Líquido conductor metálico (galinstan)

Es una aleación [17] [25] de metal líquido [13] cuya composición forma parte de una familia de aleaciones eutécticas que consisten principalmente en galio 68%, indio 22% y estaño 10%, dichas aleaciones eutécticas son líquidas a que se encuentran a temperatura ambiente. El Galinstan [28] reemplazó al mercurio debido a sus propiedades no tóxicas y se usa comercialmente en la fabricación de los termómetros, así mismo tiene una mayor reflectividad y menor densidad que el mercurio. (ver figura 18).

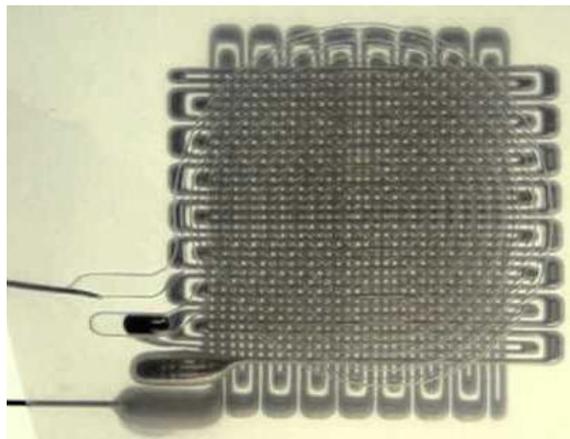


Figura 18. Uso del líquido conductor metálico

2.7. Estado del Arte.

La robótica blanda [4] es una nueva área de la Robótica, que trata de la invención de nuevos robots con materiales altamente deformables, similares a los que se encuentran en los organismos vivos. Al igual que los robots tradicionales los robots blandos [4] necesitan contar con sensores, actuadores y elementos de procesamiento de información o control, por lo tanto, nace la necesidad de crear nuevos tipos de sensores blandos, que contribuyan con el desarrollo de esta tecnología. En vista que en la actualidad existen tecnologías como la piel artificial blanda [5] [29] [6] [15] y OrbTouch. [9]

Recientemente se han reportado estudios sobre el diseño, fabricación y caracterización de nuevos sensores y actuadores blandos [21], teniendo particular interés para este trabajo de tesis el artículo científico realizado por [15] [6] Park donde se plantea la posibilidad de fabricar una piel artificial blanda. [5] [6]

La piel artificial blanda [5] del artículo de la referencia tiene la capacidad de sensor estímulos de tracción [29] en los ejes X e Y, y presión en el eje Z, pero de forma muy limitada, para bajos estímulos de presión, y sin tener resolución espacial en el área del sensor. (ver figura 19).

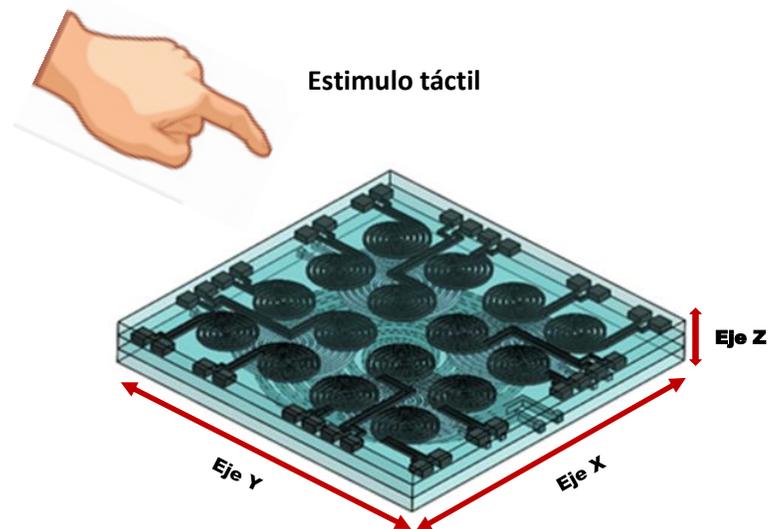


Figura 19. Referencia del eje del Sensor

Es una interfaz deformable para reconocimiento [3] táctil por medio de redes neuronales profundas, construida con conductores de hidrogel y electrodos de carbono [30] que sirven como conductores. El dispositivo funciona como un sensor capacitivo y tiene la capacidad de aprender aplicaciones y entradas determinadas por el usuario con algún entrenamiento previo. Gracias al empleo de las redes neuronales artificiales, también es posible generar un sistema de control capaz de realizar actividades como la clasificación y regresión, teniendo como una limitación importante un significativo error EMS, entre el error de entrenamiento y el error de la validación que en nuestro caso el valor EMS es menor se pudo mejorar notablemente. En esta ocasión dicho dispositivo se usó para controlar el movimiento de las figuras del juego tetris, para controlar el movimiento de las figuras del juego tetris, por medio de una interfaz blanda táctil.

Así mismo tenemos las pieles electroluminiscentes [11] elásticas para la señalización óptica y Detección táctil, los cuales son fabricados con la técnica de litografía blanda, empleando el método de moldeo. Mediante la técnica antes mencionada se crearon láminas de goma delgadas que cambian la iluminancia y capacitancia por la deformación, permitiendo así capacidad de soportar grandes estiramientos uniaxiales.

A continuación, profundizaremos en la revisión de la literatura que apoyara nuestro trabajo de investigación con los siguientes artículos científicos:

2.7.1. Diseño y fabricación de una piel artificial blanda con microcanales embebidos de líquido conductor.

En este artículo se describe el diseño, fabricación y la calibración de un mecanismo altamente compatible que se utilizará como sensor de piel artificial. El sensor de piel artificial [5] [31] [6] consiste en un dispositivo multicapa con microcanales embebidos [15] con un líquido conductor metálico (Egain) capaz de detectar estímulos de tracción en ambos ejes (X e Y), y el estímulo de presión en el eje Z (ver figura 18). pero de forma muy limitada, para estímulos de presión, y sin tener resolución espacial en el área del sensor.

Para la fabricación de los sensores se utilizó la Técnica de litografía blanda [3] usando el método de moldeo de diferentes capas, para fabricar un sensor blando de múltiples capas, y gracias a las diferentes geometrías (lineal y espiral) ubicadas en cada capa del sensor integrado podemos sensar diferentes estímulos, como de tracción [29] o estiramiento [10] y presión.

Las tres capas de material elastómero [15] de silicona con patrones de micro canales, han sido fabricados con moldes impresos en 3D [14], los cuales se unieron para crear micro canales integrados, y fueron embebidos por un líquido conductor metálico (Egain) en los micro canales [6]. Las dimensiones del canal son 200 um 200 um para la detección de un estímulo de tensión [8] y 500 um (anchura) 200 um (altura) [5] para la detección de un estímulo de presión. El tamaño del área del sensor [6] es 25 x 25 mm y el grosor es aproximadamente 3.5 mm.

El proyecto experimental fue probado con un durómetro para materiales elastómeros [9], en el cual mostró linealidad en la detección del estímulo de tensión para los ejes X e Y, y no mostro linealidad en la detección del estímulo de presión. Donde el estímulo ejercido al sensor fue repetible para ambos casos. En tanto el sensor fabricado se puede apreciar en la figura 20.

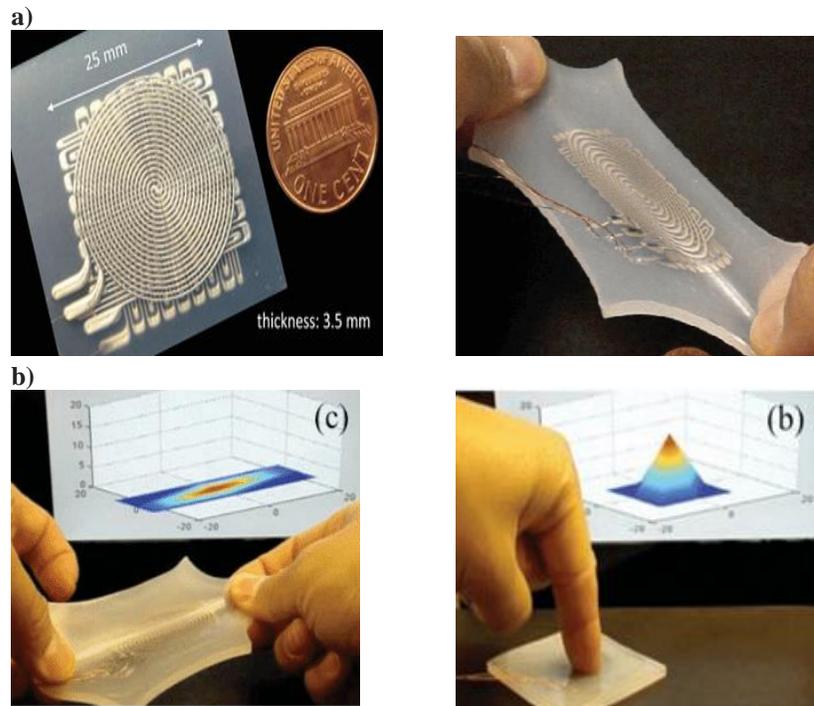


Figura 20. Piel artificial blanda con microcanales embebidos de líquido conductor

En la figura a) podemos mostrar el tamaño del sensor en comparación con el de una moneda y la gran capacidad elástica que posee ante un estímulo elástico, mientras que en b) se observa una representación gráfica tridimensional de un ensayo de tracción y un ensayo de presión.

2.7.2. Interfaz deformable con redes neuronales profundas para táctil.

Este proyecto experimental es una interfaz de usuario que proporciona una ventana interactiva entre entornos físicos y virtuales. Que concibe un nuevo concepto en el campo de la interacción humano-computadora, este dispositivo es una interfaz de usuario construida de material blando; con una superficie suave fabricada por el polímero Polidimetilsiloxano (PDMS) que facilita la interacción táctil a través de una deformación determinada. A pesar del potencial de estas interfaces, actualmente algunos dispositivos similares carecen de un marco de procesamiento de señal que pueda extraer la información de su deformación de manera eficiente y confiable, por tanto, OrbTouch [9], es un dispositivo blando que usa algoritmos de aprendizaje estadísticos, basados en redes neuronales convolucionales [12]t [20] , que sirven para mapear deformaciones desde cualquier estímulo táctil, hasta etiquetas categóricas (gestos). Mientras que, la sensibilidad táctil usa las señales de los capacitores extensibles del dispositivo como entrada para predecir la ubicación del estímulo. Pero se tiene que tomar en cuenta que el EMS del sistema posee un margen de error significativo entre el error de entrenamiento y el error de la validación. Por lo tanto, utilizando este enfoque, tenemos como ejemplo que el dispositivo OrbTouch, es capaz de controlar el popular juego Tetris. Por lo tanto, utilizando este enfoque, podemos utilizar el dispositivo para controlar el popular juego Tetris. Pero se tiene que tomar en cuenta que el MSE del sistema posee un margen de error considerable entre el entrenamiento y la validación (ver figura 21).

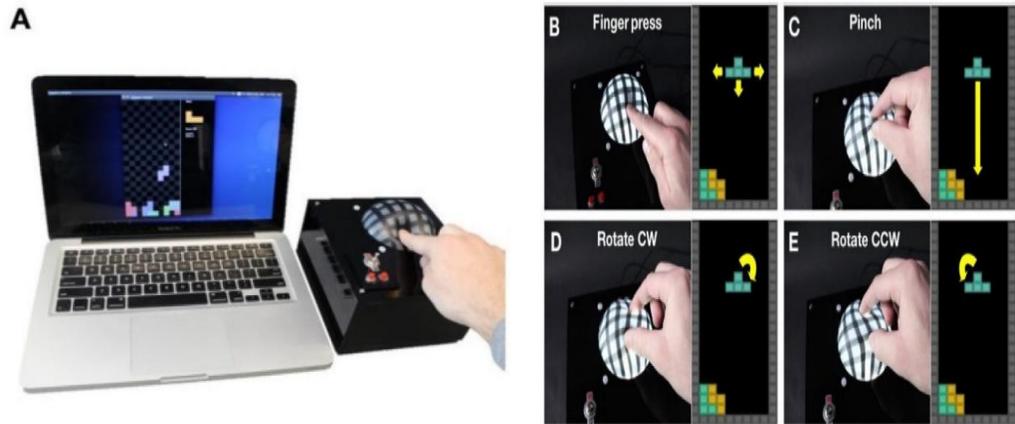


Figura 21. Representación del control del OrbTouch

En (A) se muestra el Orb Touch funcionando en una de sus aplicaciones (controlando el videojuego Tetris); En (B), el orbtouch muestra el movimiento de dirección de la figura por medio de la presión hecha por el dedo; en (C), muestra el gesto táctil de pinchado para hacer caer la figura, y en (D-E), muestra en el gesto táctil de deformación del sensor hacia un lado para representar una rotación de la figura.

2.7.3. Piel electroluminiscentes elásticas para señalización óptica y detección táctil.

Los cefalópodos [24] [32] como los pulpos tienen una combinación de piel estirable y órganos con aspecto colorante, para controlar la postura, como el color de la piel, para la comunicación visual y el mimetizado del mismo. Tratando de asemejar las características antes mencionadas se presenta un material electroluminiscente capaz de soportar grandes estiramientos uniaxiales y cambios notables en el área de la superficie [8] [5], donde al mismo tiempo emite una luz de forma activa como respuesta a su estímulo de estiramiento.

Las capas de electrodos de hidrogel transparentes intercalan una capa de elastómero dieléctrico dotado con fósforo (ZnS), creando láminas de goma delgadas que cambian la iluminancia y la capacitancia como respuesta a un estímulo de deformación.

Por ello se fabricaron matrices de píxeles controlables individualmente, en láminas de polímeros delgadas usando técnicas de litografía blanda [24] [14], por método de moldeo, las cuales se sometieron a estiramiento, plegado y laminado para demostrar su uso como pantallas extensibles (ver figura 22).

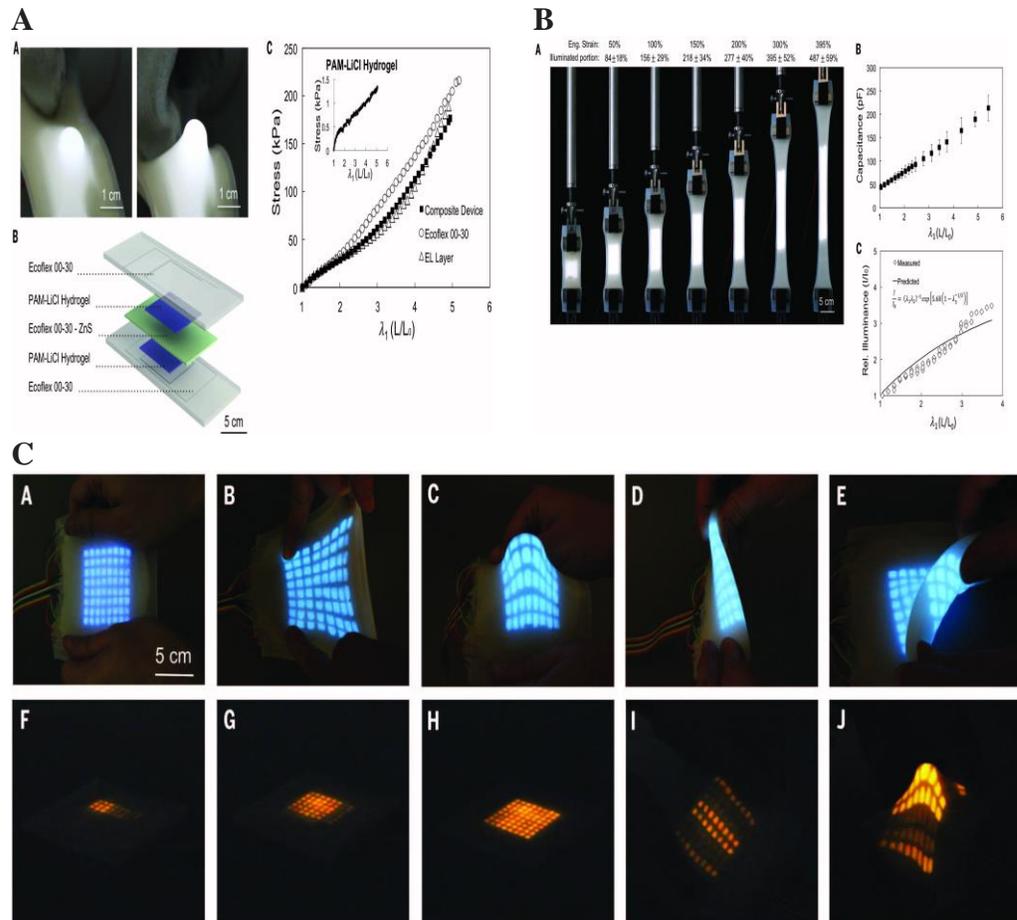


Figura 22. Funcionamiento de las pieles electroluminiscentes elásticas

En (A) se muestra la fabricación de la piel electroluminiscente elástica En (B), se muestra la medición del rango de elasticidad del polímero elastómero (C), se muestra los diferentes estados de deformación con diferente color y tamaño de pixeleado.

2.7.4. Electrónica de carbono de silicio estirable para prótesis de piel

Los receptores sensoriales en la piel humana transmiten una gran cantidad de señales táctiles y térmicas desde ambientes externos al cerebro. A pesar de los avances en nuestra comprensión de Mecánica y la termo sensación, la replicación de estas características sensoriales únicas en la piel y las prótesis artificiales sigue siendo un desafío.

Los esfuerzos recientes para desarrollar prótesis inteligentes, que explotan Los sensores de presión, tensión y temperatura rígidos y / o semiflexibles proporcionan rutas prometedoras para una nueva investigación de sistemas biónicos con carga sensorial, pero con capacidad de estiramiento limitado, rango de detección y resolución espacio-temporal.

Aquí mostramos una piel protésica inteligente equipada con un filtro de nanocarbono de silicio mono cristalino ultra fino, matrices de sensores de presión y temperatura, así como sensores de humedad asociados, calentadores electro resistivos y matrices

multielectrodos extensibles para la estimulación nerviosa. Esta colección de sensores y actuadores estirable facilitan la percepción altamente localizada de la piel mecánica y térmica en respuesta a estímulos externos, por lo tanto, se visona promisorias oportunidades únicas para las clases emergentes de prótesis y tecnologías de interfaz del sistema nervioso periférico.

Esta colección de sensores y actuadores estirable facilitan la percepción altamente localizada de la piel mecánica y térmica en respuesta a estímulos externos, por lo tanto, se visona promisorias oportunidades únicas para las clases emergentes de prótesis y tecnologías de interfaz del sistema nervioso periférico (ver figura 23).

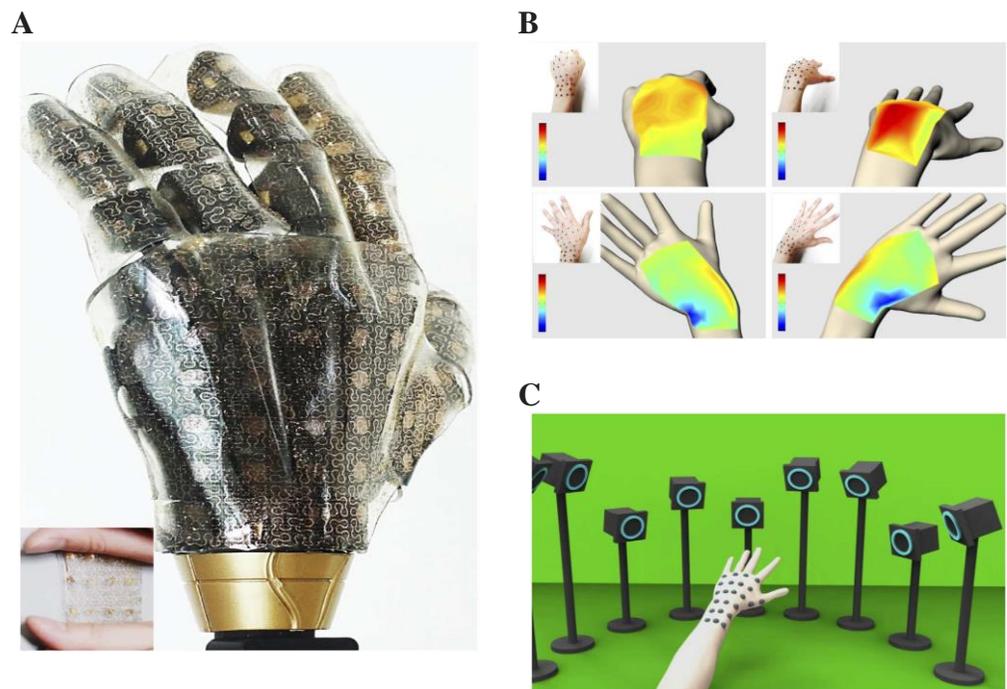


Figura 23. Representación del funcionamiento de la electrónica de carbono de silicio estirable.

En (A) Fotografía de una piel artificial inteligente representativa, integrada sensores y actuadores estirables que cubren toda el área de superficie de una mano protésica. El recuadro muestra la piel artificial estirada B20%. (B), mapas de deformación regional de la piel, calculada usando la información posicional adquirida por el sistema de captura de movimiento para cuatro movimientos diferentes: puño de apretamiento, doblado frontal, inclinación hacia la izquierda y derecho. Un recuadro superior izquierdo de cada caso muestra la mano real con marcadores reflexivos. (C), Imagen esquemática del sistema de captura de movimiento.

Capítulo 3 Metodología

La metodología que se aplicó en la presente tesis se dividió en tres etapas, que fueron Diseño, Fabricación y Caracterización los cuales se iniciaron desde la concepción del proyecto hasta obtener los resultados, donde cabe mencionar que en todo el proceso se usó el software disponible en el laboratorio, y todas las herramientas de fabricación digital que la facultad dispone.

3.1. Diseño del Sensor Blando Multiescala.

Para realizar esta etapa se revisó toda la bibliografía correspondiente, en el aspecto de diseño a otros artículos científicos similares al proyecto, dando relevancia a los tamaños y formas de los microcanales y las diferentes dimensiones del cuerpo del sensor, con mayor importancia en el grosor de la tapa y cuerpo del sensor, considerando estos aspectos:

- El diseño de la tapa del sensor, fue lo más delgada posible, pero a su vez lo más resistente para soportar el estímulo de presión.
- El diseño de los microcanales fueron lo suficiente mente amplios para que circule el líquido conductor metálico de acuerdo al tipo de sensor (ver figura 24).

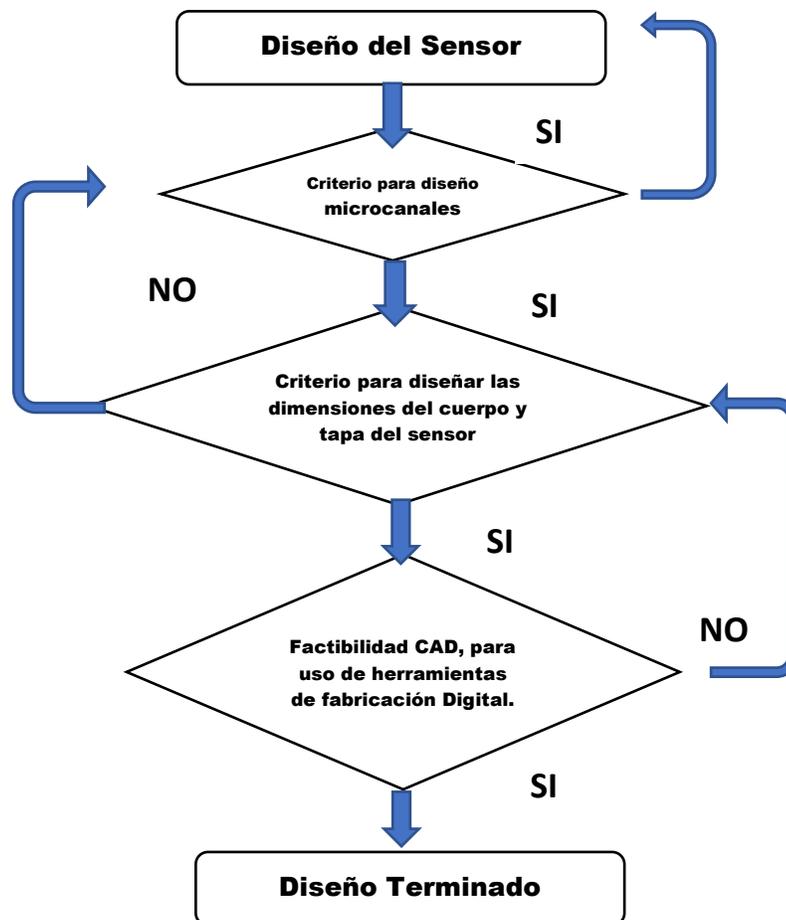


Figura 24. Esquema de metodología para el diseño del sensor

3.2. Fabricación del Sensor Blando Multiescala.

En la metodología de la Fabricación de los sensores blandos se ocupó la técnica de Litografía Blanda, para concluir exitosamente el trabajo, cabe mencionar que los moldes usados en el presente trabajo fueron impresos en el extranjero por la resolución de acabado que necesita el molde.

Es importante mencionar que los pasos de la fabricación deben ser perfectos ya que algún error en el procedimiento es irreversible y se continúa de cero el proceso (ver figura 25).

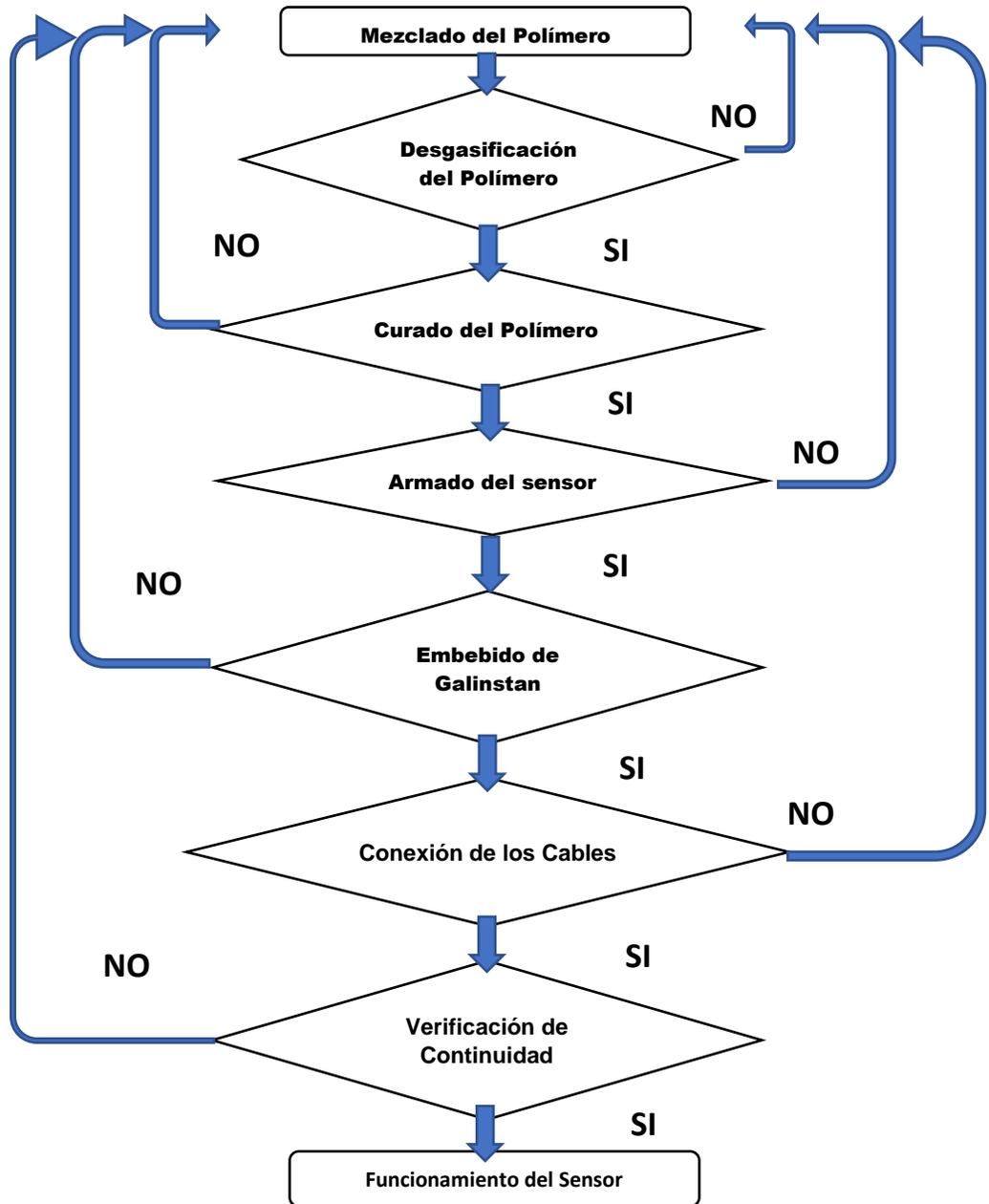


Figura 25. Esquema de la metodología para la fabricación del sensor

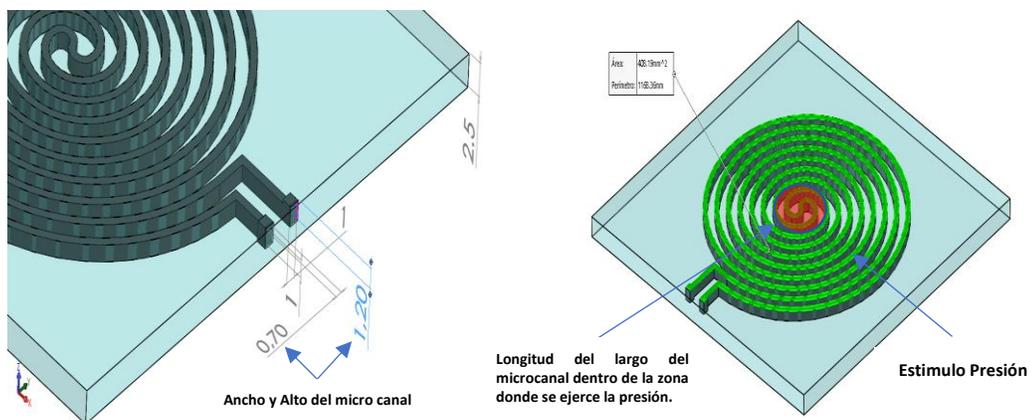
3.3. Matemática y Modelos.

La metodología de la matemática para esta tesis consistió en ocupar el modelo matemático del artículo científico, ajustándolo a nuestros valores, y obteniendo como resultado, el modelo matemático es ajustable hasta una presión de 65 kp. de presión mejorando al modelo matemático del artículo antes mencionado.

Los resultados obtenidos fueron producto del ensayo de saturación con todos los tipos los sensores inclusive los tres sub-tipos de sensores pequeños que existen, y evaluados en cada punto del rango de presión del ensayo (ver figura 70).

N°	Símbolo	Sensor Grande	Sensor Mediano	Sensor Pequeño
1	L(mts)	0,03 mts	0,06 mts	0,1 mts
2	$\rho(\Omega. m)$	$2,85 * 10^{-7}$	$2,85 * 10^{-7}$	$2,85 * 10^{-7}$
3	w (mts)	0.0007	0.0005	0.0003
4	h (mts)	0,001	0.0007	0.0005
5	E (Kp)	125 kp	125 kp	125 kp
6	P (Kp)	variable	variable	variable
7	ν	0.5	0.5	0.5

Tabla 1 Valores del modelo matemático del sensor blando



- ΔR** : Variación de la resistencia del micro canal.
- ν** : Relación de Poisson del material elastómero.
- L** : Longitud de los micro canales.
- ρ** : Resistividad eléctrica del Galinstan.
- w** : Longitud del ancho del micro canal.
- h** : Longitud del alto del micro canal.
- E** : Modulo elástico del Polímero.
- P** : Presión externa.

$$\Delta R = \frac{\rho L}{wh} \left\{ \frac{1}{1 - 2(1 - \nu^2)wP/Eh} - 1 \right\}$$

Figura 26. Modelo matemático del sensor blando

Capítulo 4: Diseño del Sensor

4.1. Diseño del sensor blando.

Un sensor blando del tipo espiral [31] [6] posee una sensibilidad y un rango de medición característico y dependiente de su geometría, tamaño y composición. Lo cual permite que el área del sensor defina la zona donde es posible detectar un estímulo táctil.

Nuestro diseño se basa en combinar distintos sensores sobre una superficie táctil de tal manera que podamos lograr aumentar la resolución espacial y también aumentar el rango de sensibilidad del estímulo táctil. En nuestro laboratorio se propuso diseñar un sensor integrado considerando tres tipos de capas (capa del sensor grande, capa del sensor mediano, capa del sensor pequeño), donde cada tipo de sensor posee características de sensibilidad diferente.

Para ello, se ha propuesto combinar los distintos tipos de sensores en un sensor integrado de tres capas, donde cada capa se encuentra asociada a una escala de presión diferente. Y la idea es generar un sensor blando integrado gracias a la combinación de señales de las distintas capas.

El diseño del sensor integrado se hizo considerando tres tipos capas (capa del sensor grande, capa del sensor mediano, capa del sensor pequeño), en cada capa existen sensores con características de sensibilidad diferente. Así mismo la orden de estas capas se encuentran en forma de pirámides gaussianas, ubicando al sensor grande en la primera capa, el sensor mediano en la segunda capa, y finalmente el sensor pequeño en la tercera capa.

Así mismo gracias al tamaño del sensor más pequeño (8mm de diámetro) Ubicada dentro de la capa de los sensores pequeños, que diseñamos en nuestro laboratorio, pudimos usar dicho sensor como la base de nuestra capa de mayor resolución (4 x 4). Favoreciendo al aumento de la resolución espacial de nuestro sensor blando.

El resultado de nuestro diseño permitió obtener un sensor blando en tres escalas de rango de presión diferente, donde se aprecia que los sensores pequeños sensan presiones, los sensores medianos presiones intermedias y el sensor grande altas presiones.

A continuación, profundizaremos la explicación del texto anteriormente mencionados con características de los tres tipos de sensores blandos diseñados con los siguientes gráficos: (ver figura 27, 28, 29).

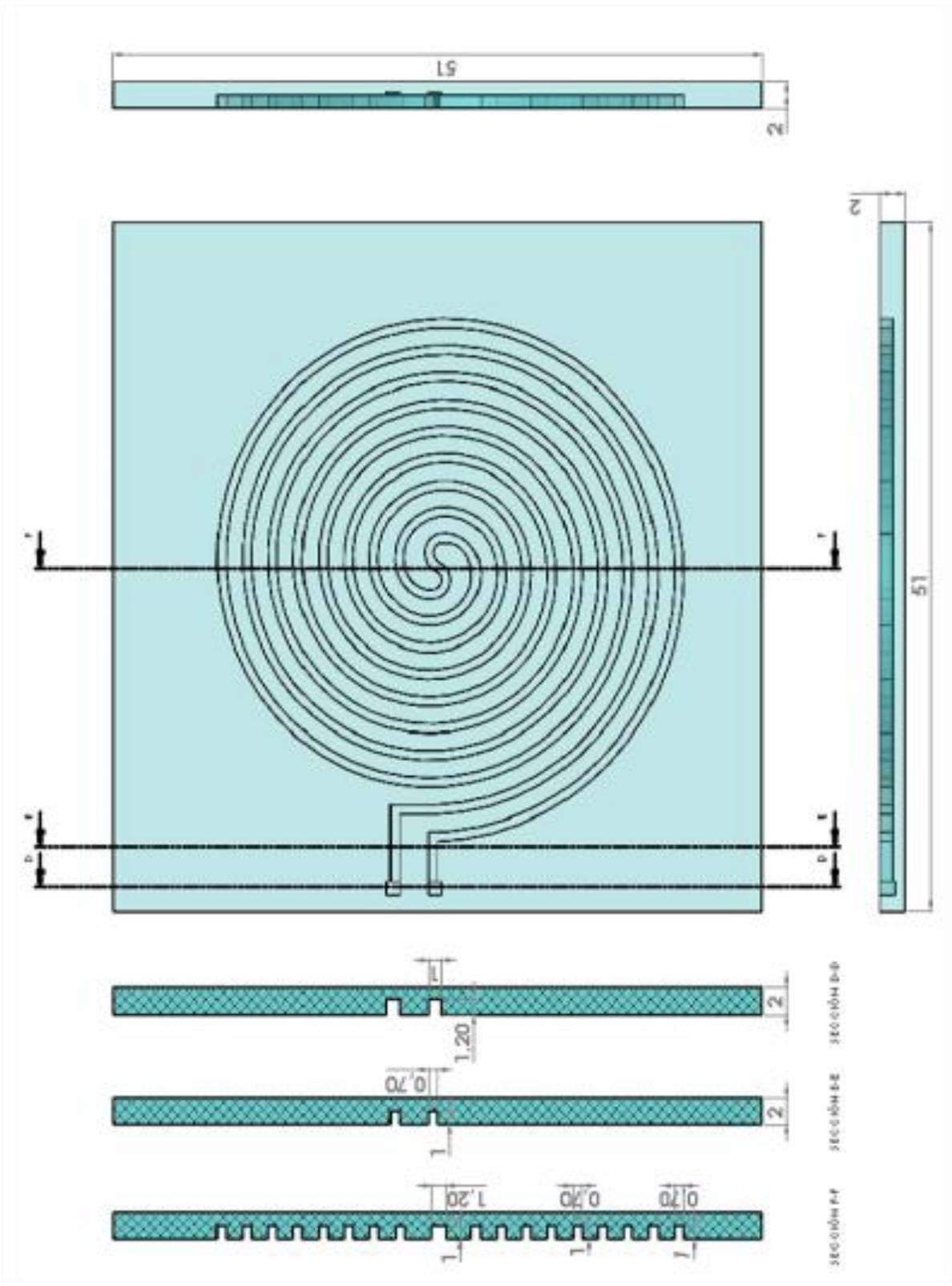


Figura 27. Diseño del Sensor grande

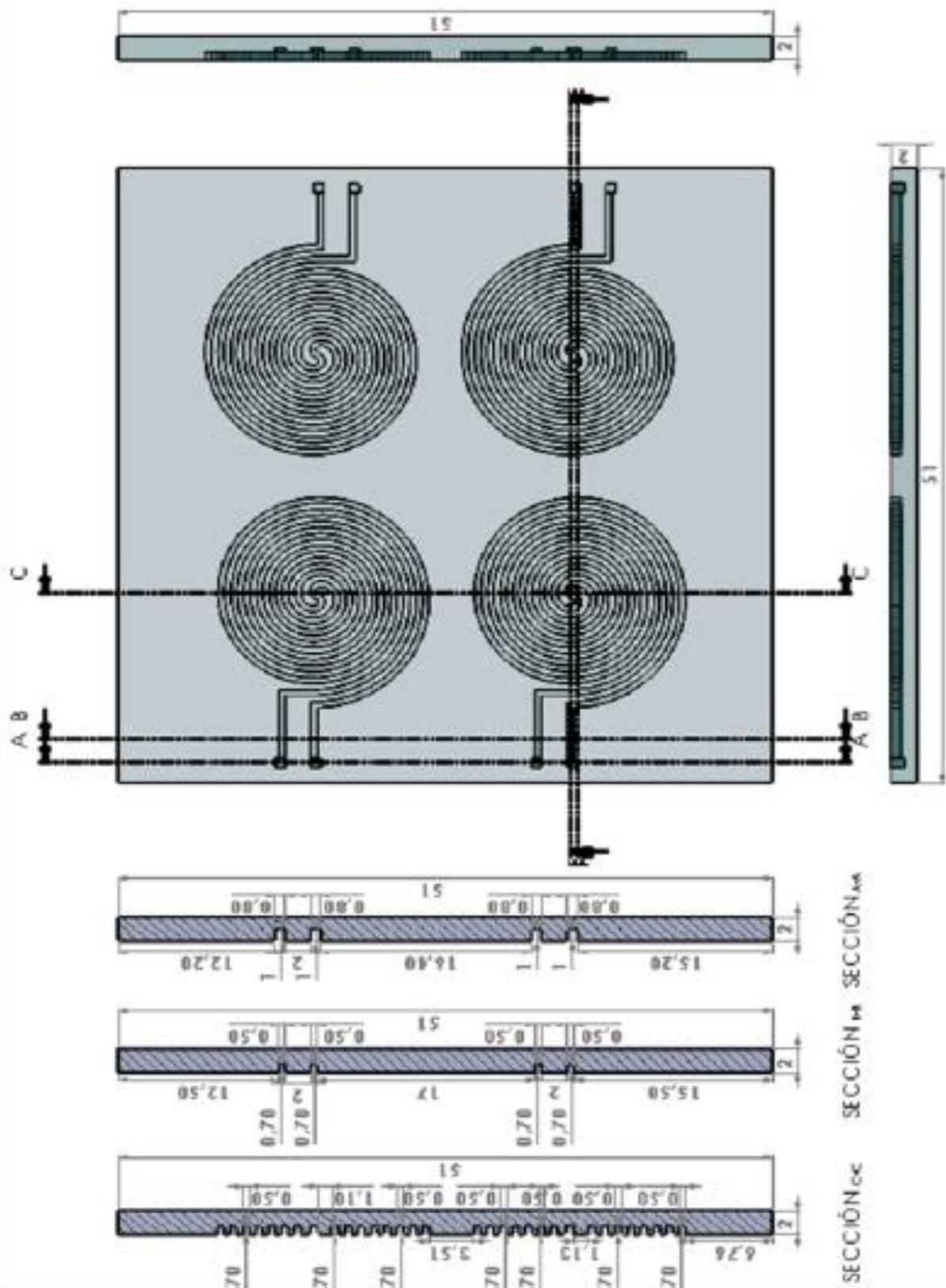


Figura 28. Diseño del sensor mediano

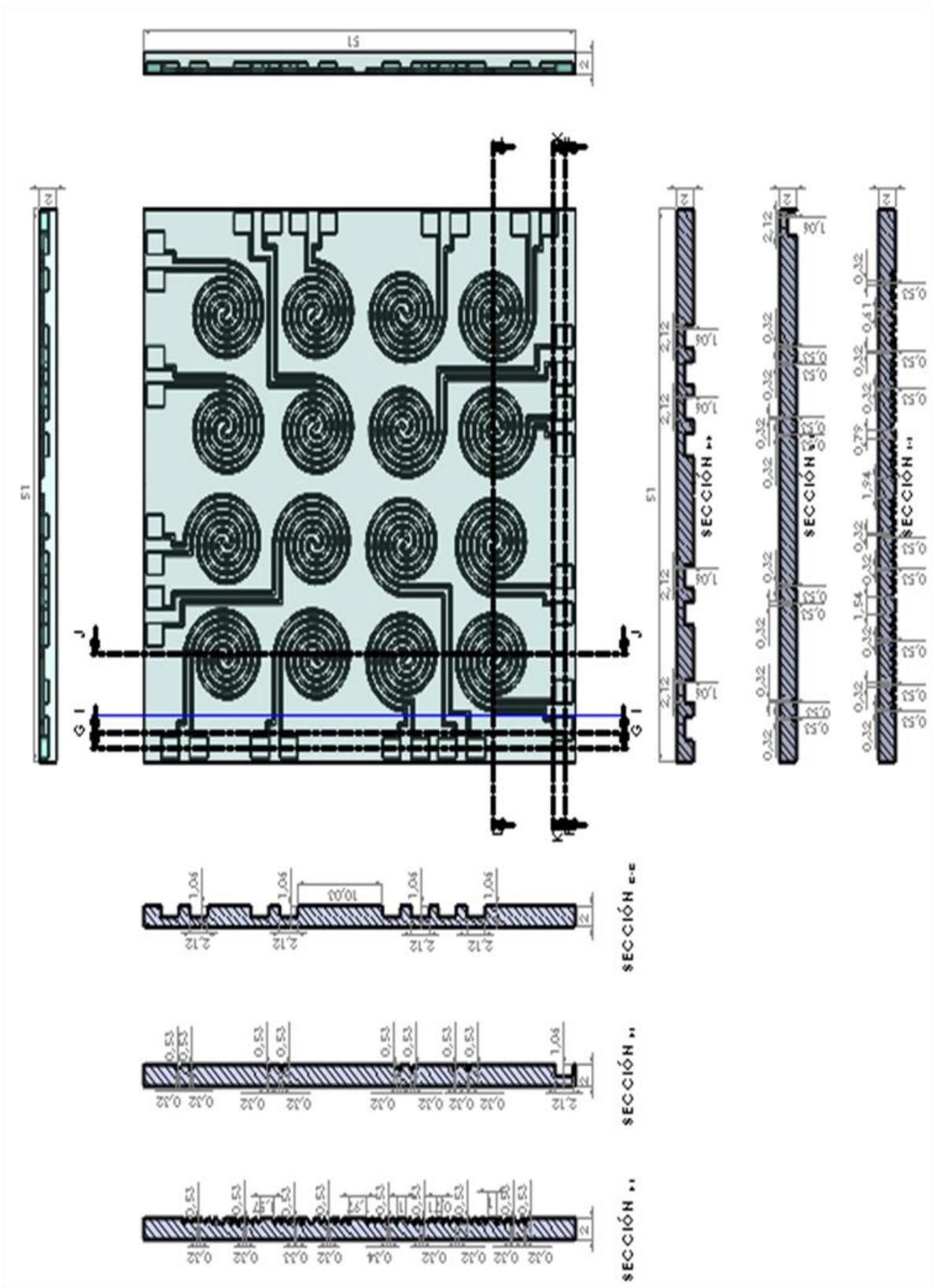


Figura 29. Diseño del sensor pequeño

Capítulo 5: Fabricación del Sensor Blando

Para llevar a cabo la fabricación del sensor blando se utilizó la técnica de litografía blanda [8] [24] [14] [23], que consiste en plasmar geometrías complejas en superficies blandas [14], pudiendo dar lugar a la formación de microestructuras como por ejemplo los microcanales. La fabricación de los sensores blandos se realizó empleando silicona epóxica en estado líquido depositada en moldes de plástico producidos con una impresora 3D.

Cabe mencionar que los moldes utilizados en la tesis, fueron fabricados empleando un servicio de impresión 3D “en la nube” (cloud manufacturing) entregada por la empresa shapeways (<https://www.shapeways.com/>) debido a la alta resolución requerida para el acabado y tipo de material requerido. Las etapas de fabricación implican tratamientos y cambios de estado, incluyendo el vacío y calentamiento con el horno eléctrico, el motivo por el cual es importante el uso de moldes en este proyecto es replicar los microcanales del sensor.

La geometría en espiral en un sensor blando, permite una concentración de mayor resistencia en el centro del sensor, ante cualquier estímulo táctil externo, con respecto a otras geometrías como la geometría triangular, cuadrada entre otras.

Para iniciar el proceso de fabricación es necesario que se disponga cuatro tipos de moldes con alta resolución (molde del sensor grande, mediano, pequeño y tapa), accesorios y materiales que se ocuparan en cada etapa de la fabricación, para que el acabado sea óptimo, y no haya problemas en las diferentes etapas del proceso. Para dicho proceso se utilizó el polímero Ecoflex 00-30 de Smooth-On (<https://www.smooth-on.com/product-line/ecoflex/>) que tiene tres ventajas importantes:

- a. Se depositan inicialmente en estado cuasi líquido pudiendo acoplar muy bien.
- b. Es autodesmoldante.
- c. Luego de ser curado puede ser estirado hasta llegar a 9 veces de su tamaño inicial.

El polímero es muy flexible y especial para moldear diferentes geometrías complejas el cual es suministrada en forma líquida mezclando sus dos componentes (A y B)

Para el proceso de fabricación es indispensable disponer los materiales, polímero Eco Flex 00-30, el líquido conductor metálico Galinstan para inyectar dentro de los microcanales, los microcables con revestimiento esmaltado para conectar el sensor y pines conductores de corriente que se usaran posteriormente como terminales del sensor blando.

A continuación, se representan las principales etapas y luego se profundiza la explicación concerniente en cada punto anteriormente mencionado (ver figura 30).

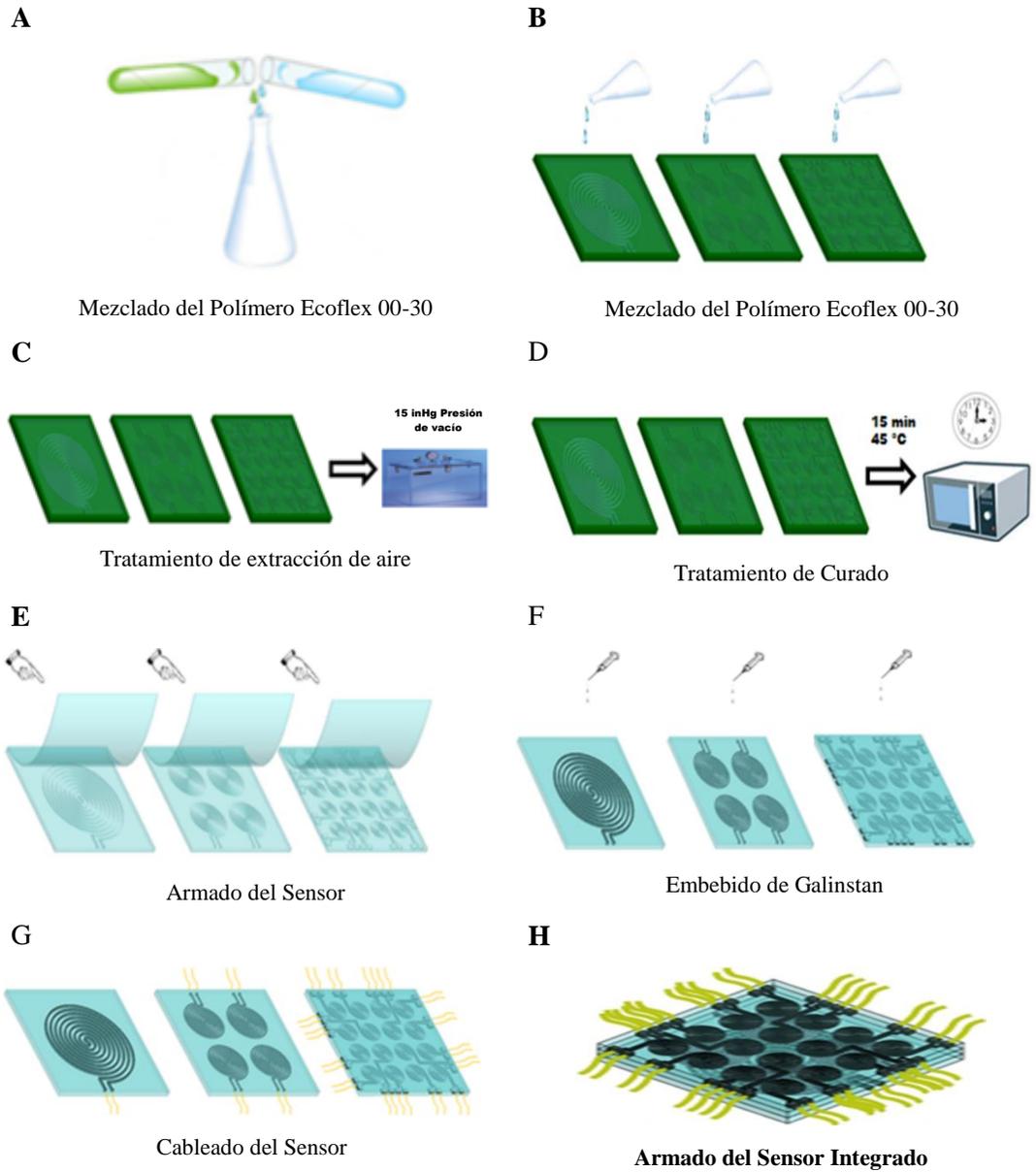


Figura 30. Proceso de fabricación del sensor blando multiescala

El proceso de fabricación comienza mezclando el polímero Ecoflex 00-30 (A), y llenándolo en los moldes impresos en 3D (B) luego realizar el proceso de desgasificación en nuestra cámara de vacío (C) y curado realizado en nuestro horno a 45°C por 15 min. (D) para proceder armar el sensor (E) y después realizar el embebido de galinstan (F) donde finalmente el cableado (G) y armado del sensor integrado (H).

- El proceso de fabricación del sensor comienza con la mezcla de los dos componentes del polímero ecoflex 00 – 30 (**fig. 30A**) en un pocillo pulcro para evitar elementos extraños que puedan contaminar la mezcla. Luego se vierte la mezcla en dos moldes (**fig. 30B**), (Cuerpo y tapa del sensor) En la figura 31 se muestra la actividad de mezclado de las soluciones (ver figura 31), teniendo en cuenta la medida de las jeringas de acuerdo a la siguiente tabla, (ver tabla 1)

N°	Tipo de sensor	Mezcla en ml	Solución A en ml	Solución B en ml
1	Sensor Blando Grande	7	3.5	3.5
2	Sensor Blando Mediano	6	3	3
3	Sensor Blando Pequeño	6	3	3
4	Tapa del Sensor	5	2.5	2.5
5	Sensor Blando Multicapa	24	12	12

Tabla 2. Consumo de Ecoflex 00-30 por sensor blando



Figura 31. Proceso de mezcla de las componentes A y B.

- Luego la desgasificación de la mezcla del polímero ecoflex 00-30 (fig. 30C) se realiza en la cámara de vacío a 15 inHg de presión como se muestra en la figura 30 C. Este proceso tiene por finalidad eliminar las burbujas de aire que se introdujeron al momento de la mezcla, para evitar encontrar burbujas de aire en el cuerpo del sensor, después de la etapa de curado. ya que son perjudiciales cuando se producen las deformaciones del sensor. (ver figura 32).

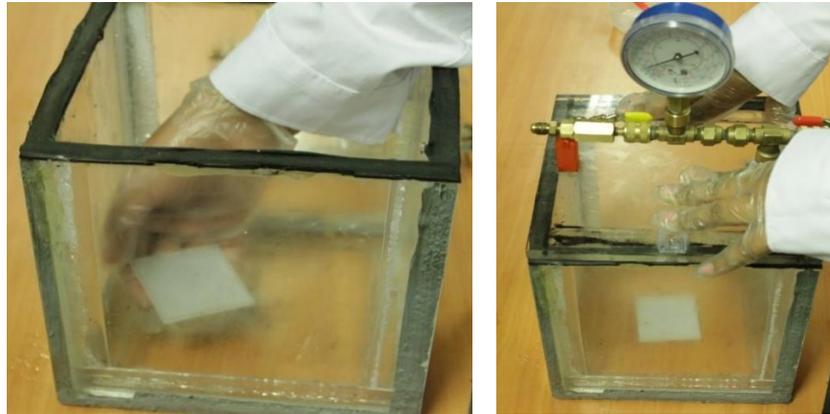


Figura 32. Desgasificación de la mezcla en la cámara de vacío

- En el tratamiento de curado (**fig. 30C**), la solución de la mezcla del polímero tiene como propiedad curarse en un tiempo de 3 horas a temperatura ambiente. Pero, sin embargo, en el laboratorio de robótica se aceleró el proceso de curado de la solución del polímero sometiendo la mezcla a un horno eléctrico a temperatura de 45 °C como se muestra en la figura 33 por un lapso de tiempo de 20 minutos, es importante mencionar que, cuando se inserta el molde con la mezcla del polímero se debe colocar una lámina de mica transparente de un tamaño significativamente mayor al área del molde, para evitar que se deforme la parte superior del molde, teniendo especial cuidado que entre la mica y el contacto con el polímero no haya burbujas de aire.



Figura 33. Tratamiento de curado

- Después del curado se procede con el armado (**fig. 30E**) de las dos partes que componen un sensor, que son la tapa y el cuerpo del sensor. Teniendo los sensores en sus respectivos moldes procederemos a sacar cuidadosamente las láminas de mica transparente como se muestra en la figura 34A evitando que el cuerpo y tapa del sensor se fracturen por la fuerza ejercida, de la misma manera procederemos a retirar el cuerpo y tapa de los moldes.

Una vez que el cuerpo y la tapa del sensor se encuentran listos para el ensamble del sensor, procedemos a rociar una ligera capa de la mezcla del polímero en toda el área de las caras del cuerpo y tapa del sensor que van a entrar en contacto, para luego proceder a juntarlas, como se muestra en la figura 34B, para después someterlo a 15 min de tratamiento de curado en el horno eléctrico verificando visualmente el estado de los microcanales en cada uno de los pasos.

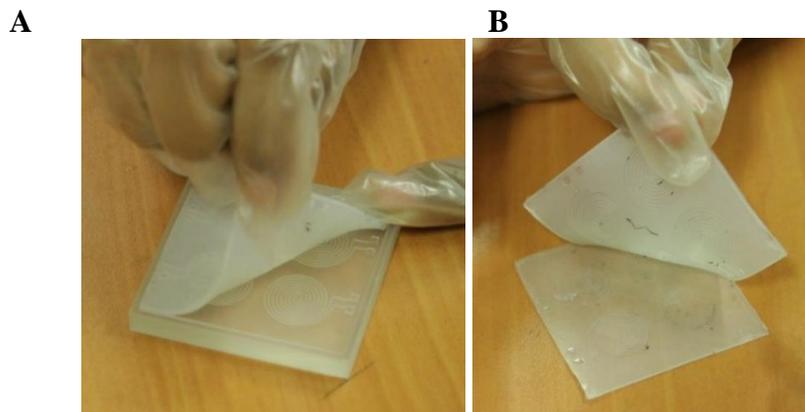


Figura 34. Armado y pegado del sensor

En (A) se muestra el procedimiento de sacar el cuerpo del sensor del molde, y en (B) se muestra el armado del sensor que consiste en pegar el cuerpo del sensor y la tapa.

- Después de verificar visualmente la integridad de los microcanales en el armado del sensor, se comprueba el estado de los microcanales inyectando un líquido colorante (de preferencia oscuro) en su interior, el mismo que se realiza inyectando dos jeringas (una para inyectar el líquido colorante y la otra para extraer el aire dentro de los microcanales) en cada uno de los terminales como se muestra en la figura 35, donde después de corroborar la integridad de los microcanales mediante el flujo del líquido colorante, se procede a retirar el líquido, y dejar un momento que se evapore las partículas de líquido en el interior.



Figura 35. Verificación de la integridad de los canales

- Para la etapa de embebido de galinstan (**fig. 30F**) a los microcanales del sensor, después de haber corroborado el óptimo estado de los microcanales por medio del flujo de líquido colorante procederemos a realizar los mismos pasos del punto anterior como se muestra en la figura 36, pero con la diferencia que esta vez se utilizara el líquido conductor metálico GALINSTA en el procedimiento. (ver figura 36).



Figura 36. Embebido de líquido conductor metálico

- Continuando la fabricación del sensor, y después de llenar los microcanales de galinstan procedemos a colocar los alambres (**fig. 30G**) esmaltados de 0.16 mm como se muestra en la figura 37 para que sirvan como alargadores del sensor teniendo en consideración que las puntas del alambre deben ser desmaltadas para que haya conductividad entre los terminales del sensor.

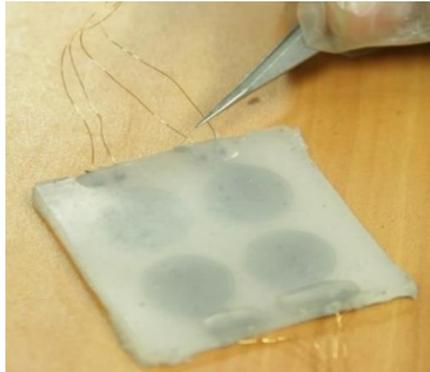


Figura 37. Colocación y fijación de los cables terminales

- Después de la fijación de los cables, soldamos los terminales de los cables con pines de bronce y luego se procede a corroborar la continuidad de la corriente entre los terminales de los alargadores con un multítester como se muestra en la figura 38, y finalmente, si el sensor responde positivamente a la medición, se rociará una gota pequeña de pegamento (La Gotita) en los empalmes ubicados entre la unión del sensor y el cable para afirmar y sellar el contacto, para luego armar el sensor integrado (**fig. 30H**).



Figura 38. Verificación de la continuidad entre terminales

Por lo tanto, como producto del proceso de fabricación se obtuvo tres sensores blandos en forma de espiral independientes uno del otro, donde al combinarse en forma sándwich se crea el sensor integrado que se encuentra ordenado en forma de pirámide gaussiana siendo esta pirámide gaussiana la representación gráfica de la distribución normal de un grupo de datos (abajo sensor grande, al medio sensor medio y arriba el sensor pequeño) Cuyo grafico de los sensores finales se muestran a continuación: (Ver figura 39)

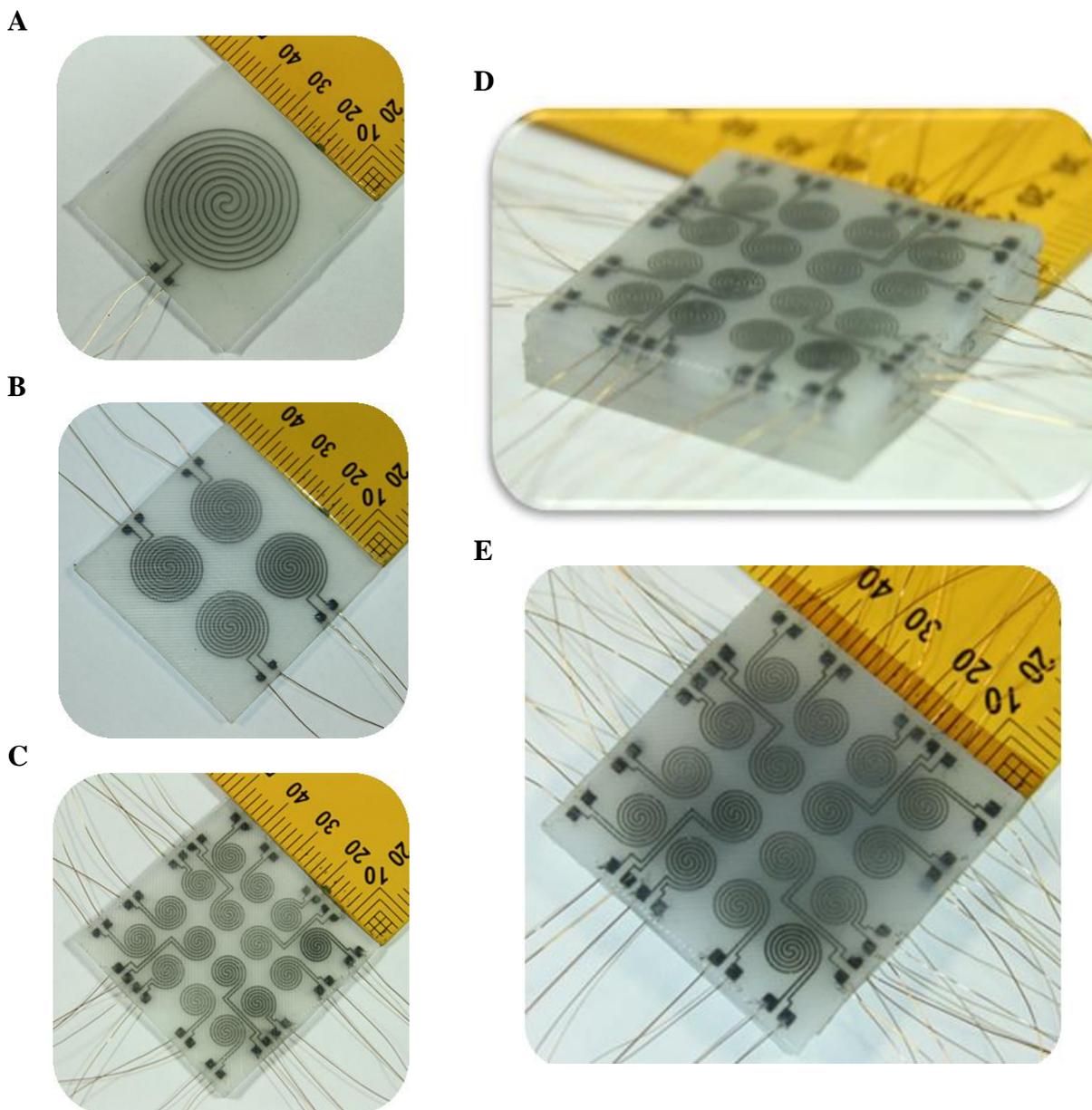


Figura 39 Sensor blando multiescala

En esta imagen se puede visualizar todos los tipos de sensores blandos con dos vistas diferentes del sensor integrado después del proceso de fabricación (A) Imagen real del sensor bando grande. (B) Imagen real del sensor bando Mediano (C) Imagen real del sensor bando pequeño (D) Imagen real del sensor bando Integrado con una vista frontal ligeramente inclinada (E) Imagen real del sensor bando integrado con una vista superior.

Capítulo 6: Caracterización y Resultado

La caracterización es el proceso que permite establecer la resistencia eléctrica de un sensor en función de un estímulo mecánico. En este caso el estímulo se define por un área circular donde se aplica desde la mínima fuerza. Al conocer el área y la fuerza es posible determinar la presión ejercida sobre determinado perímetro.

el entrenamiento es el proceso que permite adaptar la respuesta neuronal del sensor integrado frente a una secuencia de estímulos conocidos de manera tal de lograr que pueda predecir el valor correcto frente a un nuevo estímulo. Para lograr esto durante el entrenamiento se equiparán los pesos sinápticos y bias asociadas a cada neurona, con el fin de que a partir que tengamos datos de entrada, genere una salida. Y con respecto al resultado se plasmará diferentes gráficos, producto de los diferentes experimentos realizados en el laboratorio de robótica.

Para la presente tesis existió la necesidad de caracterizar cada sensor a fin de reconocer el comportamiento electromecánico en las formas de curvas del tipo esfuerzo – variación de resistencia. (Instrumento de medición que estimula y mide las deformaciones del sensor) y el sensor blando (dispositivo resistivo, que ante un estímulo de deformación muestra una señal medible), para este proceso, en una etapa inicial se evaluó usar como instrumento de medición para estímulos de presión de los sensores blandos una maquina universal de ensayos mecánicos que realiza ensayos estáticos de presión, tracción y flexión (Instron), el cual fue descartado por la limitante, que solo realizaba análisis de presión del sensor en una sola posición, y se necesitaba imperiosamente dicho análisis pero en diferentes posiciones del área del sensor y además la presión se encontraba fuera del rango de la sensibilidad que necesitábamos.

En vista que el instrumento de medición que disponíamos en la universidad no era factible para nuestro trabajo, procedimos a implementar, un instrumento de medición de presión para polímeros altamente deformables que consistió en adaptar la zona de la bandeja de impresión, en un instrumento de medición (balanza), y la parte del extrusor en una base de fijación del pulsador. Cabe remarcar que la diferencia entre el Instron y nuestro Instrumento de medición, es que nuestro instrumento de medición tiene la capacidad de poseer un cierto grado de libertad para desplazamientos en los ejes X e Y (30 mm), característica que no dispone el Instron, y que los rangos de presión que maneja nuestro instrumento de medición son menores al instron, debido a que los materiales que son medibles en el (Instron) empiezan a medir a partir de 5.099 kgf.

El uso del instrumento de medición se realiza mediante el software repetir host (software libre de fácil uso para controlar impresoras 3D), por medio de comandos Gcode (lenguaje de programación en control numérico para maquinas CNC) que permitan darle las coordenadas al pulsador en los ejes (X e Y), y altura a la balanza en el eje Z, siendo esto muy importante para la detección de la ubicación del estímulo táctil y rango de presión que se ejercerá en el sensor blando.

El entrenamiento de las redes neuronales para este trabajo consistió inicialmente en realizar rutinas de 10000 puntos en el tiempo, para 300 pulsaciones, con coordenadas aleatorias y tres presiones distintas, para mapear un área de resolución de 10 x 10 que servirá para etiquetar los puntos cada 3 mm en los ejes (X e Y) dentro del área del sensor (30 X 30 mm), de igual manera trabajar en la misma rutina, pero con tres presiones diferentes para cada punto en el área de resolución espacial,

con la finalidad, que nuestro sensor tenga la capacidad de distinguir presiones bajas (3Kp) , presiones intermedias (20 Kp) y presiones altas (50 Kp).

6.1. Implementación del Instrumento de medición en la impresora TOALA – PRINTER.

Dada la necesidad de tener un instrumento que ayude a la caracterización de los sensores blandos, se vio por conveniente implementar una balanza en la zona de la bandeja de impresión de la impresora 3D TOALA PRINTER, así mismo acondicionar en la zona del extrusor una base para fijar la viga que sujeta al pulsador para que el instrumento de medición posea la capacidad de desplazarse en un campo de acción sobre un plano X e Y (30 x 30). y sobre el eje Z un rango de 100 mm.

Los diseños de las piezas se realizaron en el software solidworks, el corte de los planos, de los acrílicos que componen la estructura de la balanza se hicieron en la cortadora láser epilog de la facultad (máquina de corte y grabado a láser para diferentes materiales), y la construcción se realizó en el laboratorio de robótica teniendo como resultado el siguiente instrumento de medición. (ver figura 39)

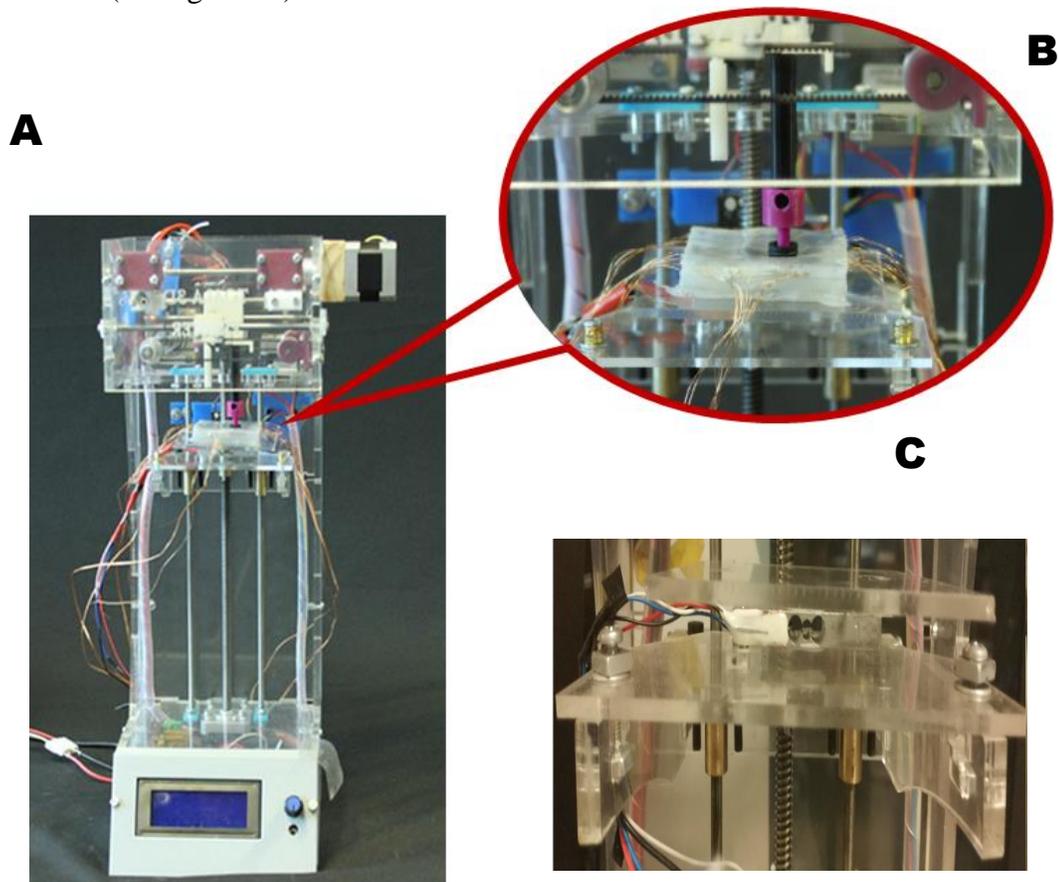


Figura 40. Implementación de la balanza en el instrumento de medición

A continuación, se aprecia el instrumento de medición para medir el rango de presión y la ubicación del estímulo de presión de los sensores blandos (A) Imagen frontal de la impresora 3D implementada con el instrumento de medición, pulsador y sensor. (B) Imagen mostrando la balanza con el pulsador presionando al sensor (C) Imagen frontal de la balanza instalada la impresora 3D.

6.2. Diseño, Fabricación, Implementación de las Piezas de la Balanza.

En esta etapa de diseño del prototipo de la balanza se consideró las mismas partes que disponía una balanza electrónica, con la consideración de que tenía que ser acoplado en la estructura de base de la bandeja de impresión de la impresora 3D Toala printer, la cual se consideró 4 piezas, las cuales son, la base de balanza en el soporte del eje Z de la impresora, dos seguros pasadores que sostengan la celda de carga, una celda de carga y por último el platillo de la balanza.

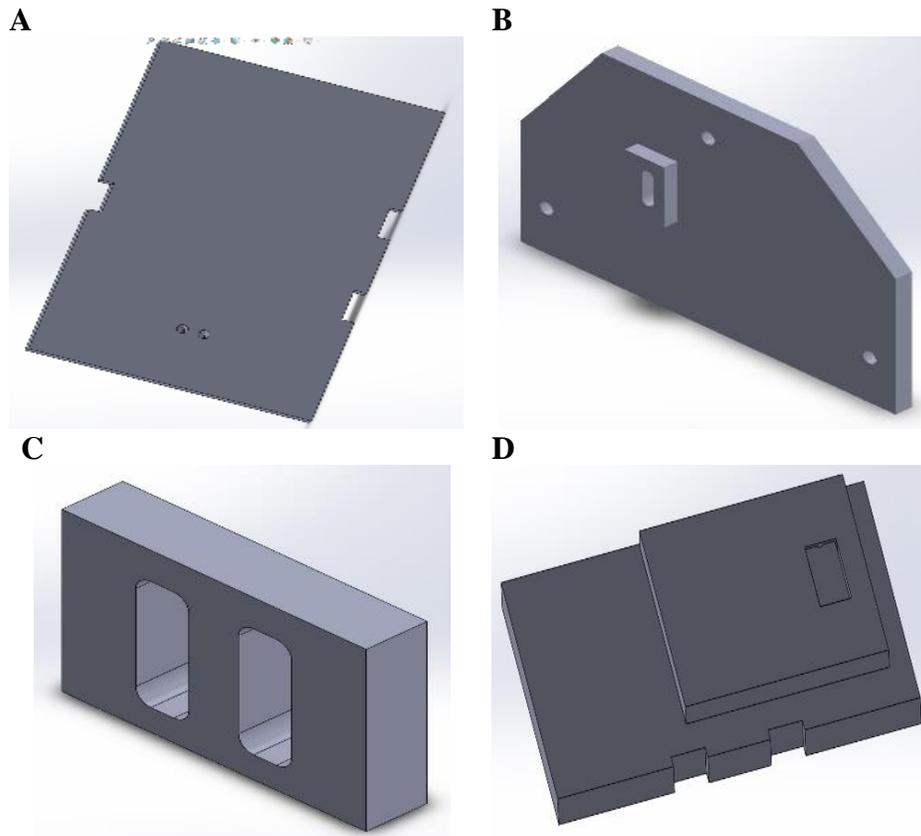


Figura 41. Partes de la balanza del instrumento de medición
Todas las partes de la balanza fueron construidas en acrílico para mimetizarse con la estructura de la impresora 3D. (A), Imagen de la base de la balanza que se instaló en el soporte de la bandeja. (B) Imagen de la plataforma de la balanza con un seguro pasador. (C) Imagen de un seguro pasador (D) Imagen de la Balanza armada.

6.3. Diseño y fabricación de accesorios del instrumento de medición

Después de la construcción del instrumento de medición para polímeros altamente deformables en el laboratorio de robótica, se creyó conveniente realizar el diseño y fabricación de un set de accesorios que ayudaran al instrumento de medición, para realizar los diferentes experimentos con los sensores blandos, El diseño de accesorios se realizó en solidworks y la fabricación de los mismo se realizó en una impresora 3D, excepto las bolas omnidireccionales que fueron adquiridas en el mercado local.

La ayuda que proporciona estos accesorios al instrumento de medición sirven, por ejemplo, para analizar el estímulo de presión al sensor blando con pulsadores de igual tamaño de área (10 mm^2) pero con diferente forma geométrica en la punta del pulsador, las cuales son de forma rectangular, cuadrada, triangular y circular. También se puede analizar el estímulo de presión al sensor blando con pulsadores de forma circular, pero con diferente diámetro en la punta del pulsador, cuyas dimensiones son (15, 12, 9, 6) mm. Así mismo se confecciono los fijadores para las bolas omnidireccionales que tienen por finalidad romper la fricción entre el sensor y el pulsador, y así construir diferentes figuras sobre la superficie del sensor pequeño a presión constante.

Una de las características de la fabricación de dichos accesorios, es que fueron construidos a medida de la estructura de instrumento de medición, y el material que se usó para la fabricación fue PLA, los cuales se representa a continuación:

A



B



C



D



Figura 42. Accesorios del instrumento de medición.

Las imágenes de los accesorios que dispone el instrumento de medición son: (A) Juego de pulsadores de diferente forma geométrica, pero con igual área. (B) Juego de pulsadores de igual forma geométrica, pero con diferente tamaño de diámetro (C) Juego de dos bolas omnidireccionales para mediciones de presión constante (D) Sujetador de viga con dos tamaños de viga de diferente medida.

6.4. Diseño y Construcción del Sistema de Amplificación.

En vista que las señales emanadas por los sensores blandos sin amplificación son muy bajas, ya que oscilan en el rango de 1.45 a 1.50 mv, y para utilizarse con el microcontrolador arduino que trabaja en un rango de 0 a 5000 mv, es necesario amplificar electrónicamente la señal para explotar mejor el rango de medición del arduino. Todo esto fue comprobado inicialmente en un circuito construido en un protoboard del laboratorio de robótica, se determinó analizar la cantidad de voltaje que se necesitaba obtener del sensor para trabajar de manera idónea con el microcontrolador arduino, donde se definió trabajar con señales ampliadas en el rango 340 a 840 mv. Para el mejor análisis de datos en la fase de caracterización. Por lo cual se construyeron dos prototipos de circuitos de amplificación de señal, una para cuatro canales y el otro para 22 canales.

El diseño del diagrama electrónico para este circuito se realizó en el software libre Eagle, donde se consideró primero las dimensiones que debía tener la PCB, ya que por la cantidad de canales y disposición de la maquina CNC no podía ser muy grande, así que por lo tanto se decidió hacerlo en dos niveles electrónicamente conectados con algunos accesorios fabricados empleando impresión 3D.

En este contexto es muy importante mencionar que para la construcción del circuito de amplificación de señal se utilizó el amplificador instrumental INA 128P, considerando ciertos parámetros como: la amplificación de 22 canales que son una (01) balanza, un (01) sensor grande, los cuatro (04) sensores medianos y dieciséis (16) sensores pequeños, donde otro factor importante para la fabricación fue la extirpación completa del cobre residual de ambas caras de las PCB's que fueron favorables ya que disminuyeron significativamente el ruidos en las señales.

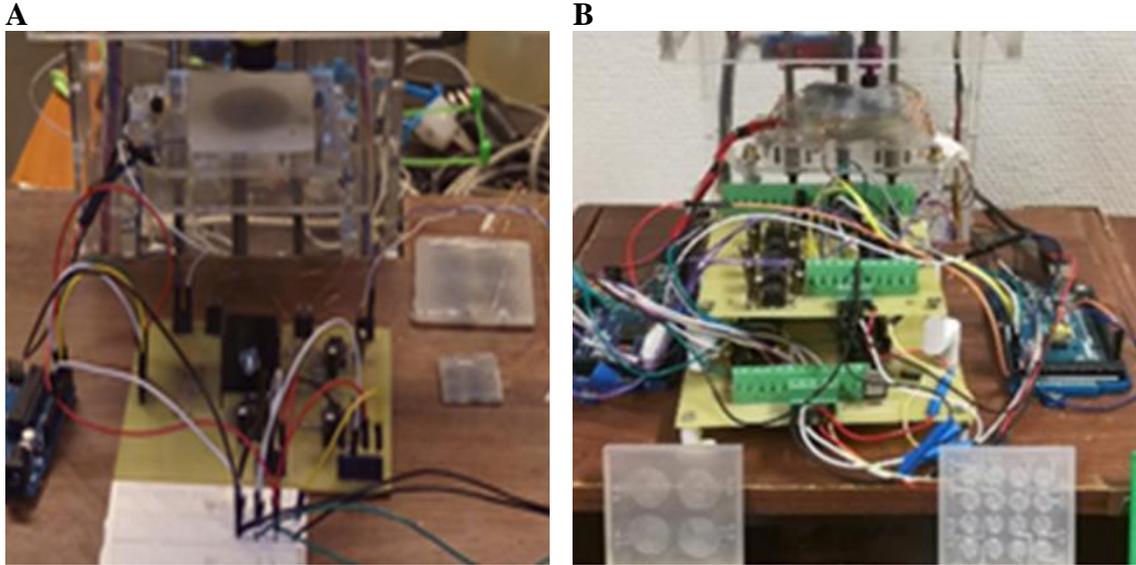


Figura 43. Imágenes de los circuitos de amplificación del Montaje Experimental. En (A) Este es el Prototipo inicial de 4 canales de medición que se realizó para verificar la operatividad del circuito y evaluar el rango de las señales de acuerdo a las resistencias de ganancia que se le instalo, que habilita 4 canales de medición. (B) Acá se aprecia el Prototipo final de la PCB que se encuentra con las fallas o errores corregidos del prototipo inicial, y se encuentra armado con los accesorios de impresión de impresión 3D que habilita 22 canales de medición.

6.4.1. Diseño del diagrama del sistema de amplificación.

La parte del diseño del diagrama del circuito electrónico se confecciono en el software Eagle, software libre especializado en diseño de diagramas para PCB con auto enrutador de fácil uso, el primer diseño del diagrama electrónico, se confeccionó para 4 canales de medición, el cual tuvo como finalidad estudiarlo en los aspectos técnicos de la placa y evaluar las señales de ganancia que arrojaban los circuitos INA128P. después de estudiar el prototipo inicial se procedió a diseñar el prototipo final teniendo en cuenta los posibles lugares donde se podía confeccionar la placa PCB diseñada, ya que las máquinas CNC que disponía la universidad, no maquinaban placas PCB grandes, solo hasta 20 X 18 cm, por lo cual se decidió hacer el prototipo del circuito de amplificación en dos placas PCB, una para 12 canales y la otra para 10 canales, electrónicamente conectadas en dos niveles, donde se tuvo el apoyo de la maquina CNC para PCB del laboratorio de electro tecnología del departamento de ingeniería eléctrica y cabe remarcar que todos estos prototipos se maquinaron por ambas caras, retirando completamente el cobre residual.

Otras características técnicas de los diseños son verificar el tamaño de vías, tamaño de pads, para disminuir la resistencia de la corriente sobre un conductor, como distancia entre vías, forma y distancia entre pads para evitar posibles corto circuitos dentro la placa. Los diseños elaborados en Eagle se detallan en el capítulo de anexos, donde se muestra los diagramas de los dos prototipos en formato

esquemático y board, y a continuación se muestra el esquema del circuito de amplificación de nuestro montaje experimental.

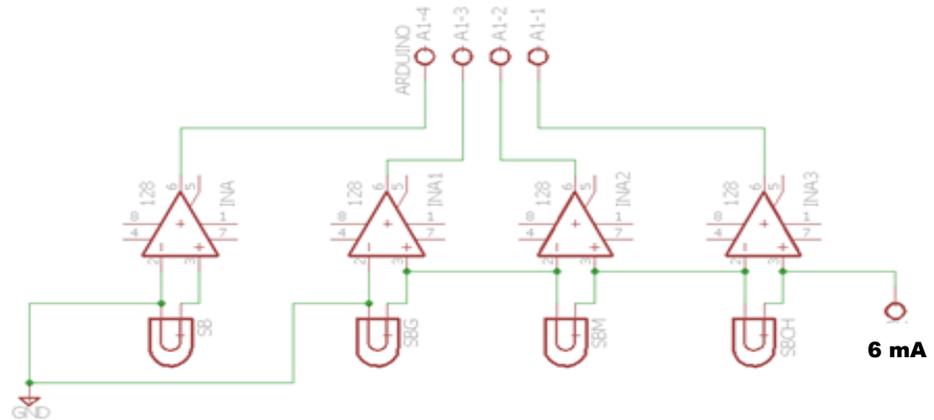


Figura 44. Esquema del circuito electrónico de amplificación

El esquema de conexión del circuito de amplificación se basa principalmente en el uso del amplificador instrumental INA128P, dicho diagrama muestra la conexión en serie de los sensores con una misma corriente de 6mA (parte inferior derecha a izquierda) representados (SBG sensor blando grande, SBM sensor blando mediano, SBCH sensor blando pequeño), y el SB sensor balanza (en la esquina izquierda inferior) que es alimentada con 5volt, donde la salidas A1 (ubicadas en la parte superior) será conectada a un microcontrolador.

6.4.2. Fabricación y construcción del circuito de amplificación de señal.

La razón por la cual se construyó dos prototipos de PCB fue para mejorar el diseño identificando posibles fallas y errores en el primer prototipo. Todo esto para mejorar en el aspecto de diseño y de construcción el prototipo final que se utilizara para la amplificación de los 22 canales de medición.

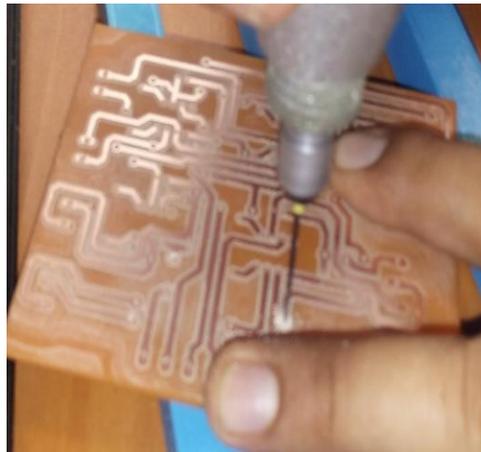
Cabe mencionar que la fabricación del primer prototipo se realizó en una maquina CNC para maquinado de PCB disponible en el laboratorio de electro tecnología del departamento de ingeniería eléctrica, y la implementación de los dispositivos electrónicos se realizó en el laboratorio de robótica del departamento de ingeniería mecánica, cumpliendo el procedimiento siguiente: Al recepcionar la PCB, se procedió a eliminar las pequeñas islas de cobre para disminuir el ruido del amplificador, luego se procedió con el testado de las vías y pads del circuito teniendo como referencia el diseño del sensor con el soldado de los dispositivos y componentes electrónicos en la cara superior del PCB, para después ponerlo en funcionamiento y verificar la operatividad del circuito. Para explicar el presente punto se mostrará un gráfico con la fabricación y un cuadro con los detalles generales del circuito. (ver figura 45) (ver tabla 2).

Detalles Generales del PCB del circuito amplificador de 4 canales:

Tabla 3 Características del circuito amplificador de 4 canales

N°	Detalle del Prototipo	Características	Obs.
	Características Generales de Prototipo		
01	Función del Prototipo	Amplificación	
02	Tipo Fuente de Alimentacion	AC	
03	Canales de amplificacion	04 canales	
04	Tipo de Circuito	En Serie	
05	Tipo de voltaje	Tierra, -5, 5, 12 volts.	
06	Nro de PCB	1	
	Dimensiones del Prototipo		
01	Ancho	8.5 cm	
02	Largo	7.5 cm	
03	Alto	3 cm	
	Componentes		
01	Ina 128P	4 uu.	
02	Condesadores 0.01 uf	8 uu.	
03	Resitencias 560 ohm	2 uu.	
04	Resitencias 410 ohm	2 uu.	
05	Resistencias 580 ohm	1 uu	
06	Resistencias 860 ohm	1 uu	
07	Regulador de Volteja	1 uu.	
08	Soquet para Ina	4 uu.	

A



B



Figura 45. Prototipo del circuito electrónico de cuatro (04) canales del sistema de amplificación

En esta imagen se aprecia cómo se preparó la placa del circuito de amplificación para medir solo cuatro canales (A) Se muestra el trabajo de corrección de los orificios por donde se van a instalar los dispositivos electrónicos (B) Se muestra la placa PCB limpia de islas de cobre y lista para instalar los componentes electrónicos.

Continuando con la fabricación del segundo y último prototipo se realizaron los pasos anteriormente explicados en el punto (6.4.2) con la diferencia que para este caso se construyó el circuito de amplificación para 22 canales de medición, y ya no presentaba errores en la construcción. El circuito en dos niveles electrónicamente conectados y armado con piezas fabricadas con impresión 3D, para ampliar el presente punto se muestra un gráfico con la fabricación y un cuadro con los detalles generales del circuito. (ver figura 45)

Detalles generales del PCB del circuito amplificador de 22 canales:

Tabla 4. Características del circuito electrónico del sistema de amplificación

N°	Detalle del Prototipo	Características	Obs.
	Características Generales de Prototipo		
01	Función del Prototipo	Amplificación	
02	Tipo Fuente de Alimentacion	AC	
03	Canales de amplificacion	22 canales	
04	Tipo de Circuito	En Serie	
05	Tipo de voltaje	Tierra, -5, 5, 12 volts.	
06	Nro de PCB	2	
07	Coneccion entre las 2 PCB	Cableado	
	Dimensiones del Prototipo 1		
01	Ancho	11 cm	
02	Largo	12 cm	
03	Alto	3.5 cm	
	Dimensiones del Prototipo 2		
01	Ancho	15 cm	
02	Largo	13 cm	
03	Alto	7.5 cm	
	Componentes		
01	Ina 128P	22 uu.	
02	Condesadores 0.01 uf	44 uu.	
03	Resitencias 560 ohm	6 uu.	
04	Resitencias 410 ohm	16 uu.	
05	Resistencias 580 ohm	1 uu.	
06	Resistencias 860 ohm	1 uu.	
07	Regulador de Volteja	1 uu.	
08	Soquet para Ina	22 uu.	

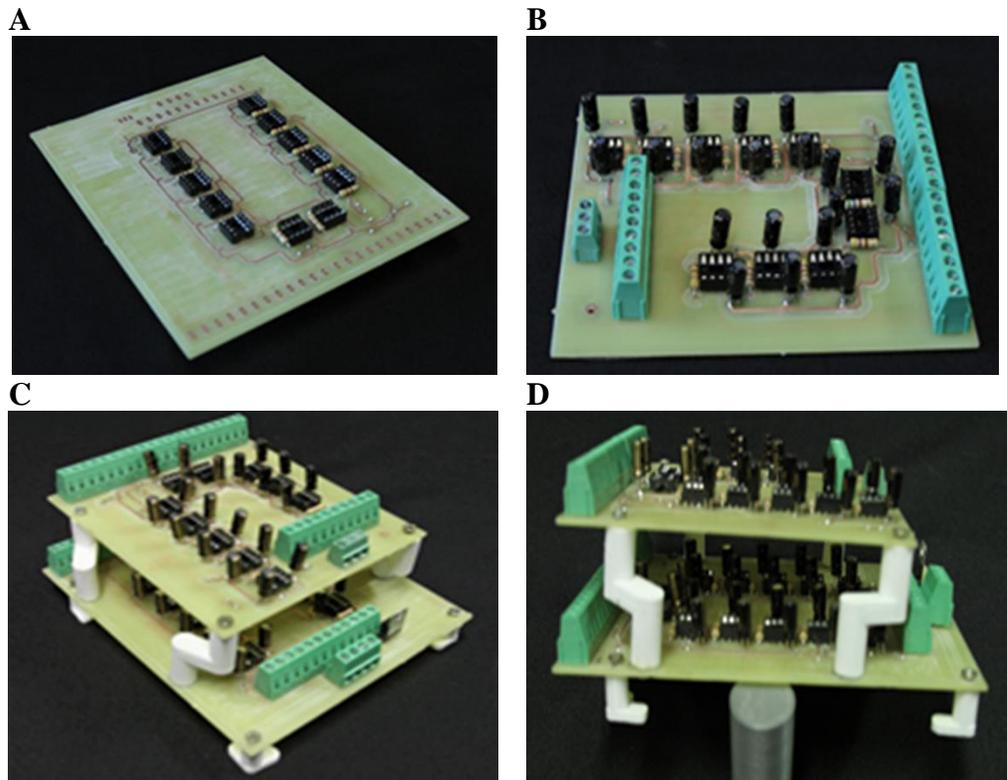


Figura 46. Construcción del prototipo final del circuito electrónico del sistema de amplificación.

En esta imagen se muestra algunas etapas del proceso de construcción del Circuito de amplificación para 22 canales de medición. (A) La imagen muestra el proceso de soldado de la placa de 12 canales de medición ubicada en la parte inferior del circuito (B) La imagen muestra el proceso de soldado de la placa de 10 canales de medición ubicada en la parte superior del circuito (C) La imagen muestra la construcción de los dos niveles del circuito amplificador de los 22 canales de medición vista diagonal. (D) La imagen muestra la construcción de los dos niveles del circuito amplificador de los 22 canales de medición con vista frontal inclinada.

6.4.3. Funcionamiento del sistema de amplificación de las señales

La señal generada de nuestro sensor es el resultado de un estímulo táctil, que se traduce en una señal eléctrica, pero dicha señal es muy baja para trabajar con nuestro microcontrolador y por tanto es necesario amplificar la señal en rangos óptimos medibles por el microcontrolador (ver 6.4).

La amplificación de la señal para este caso tiene la función de incrementar el valor de voltaje de la señal que se le aplica a su entrada, obteniendo la amplificación de señal con el amplificador instrumental de baja potencia INA 128P. (ver figura 47)

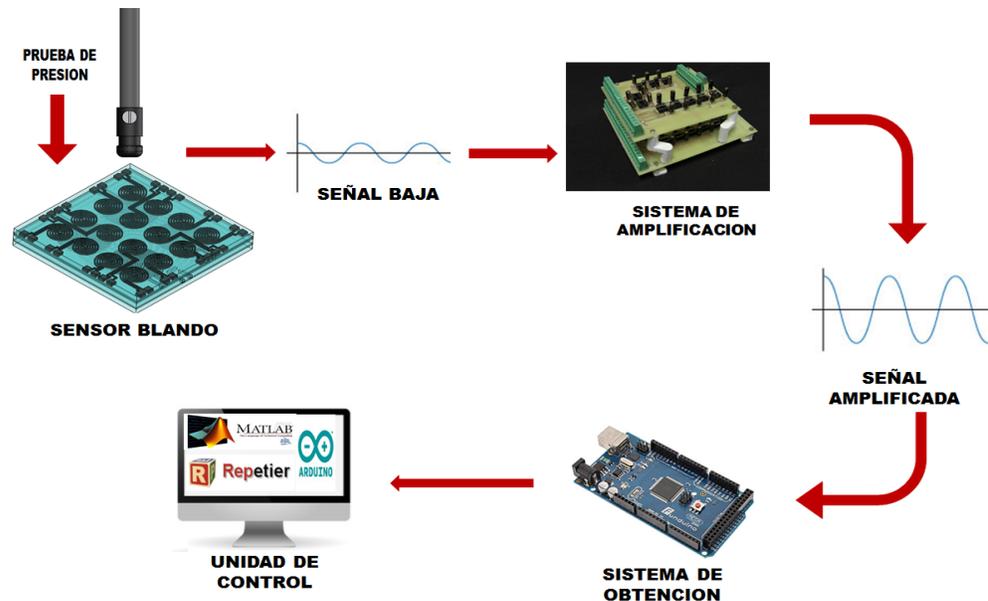


Figura 47. Sistema de amplificación de la señal

El sistema de amplificación se demostrará mediante este esquema, el estímulo táctil o deformación de un sensor generará una señal muy baja que al ingresar al sistema de amplificación dicha señal aumentará en su salida la cual será llevada a un microcontrolador para que este último transporte dicha señal amplificada a una unidad de control donde será procesada y analizada.

6.5. Estudio y Análisis del Sensor blando con forma espiral.

6.5.1. Sistema de adquisición de datos.

El concepto de la adquisición de datos consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otros dispositivos electrónicos (sistema digital), La adquisición de datos consiste en tomar un conjunto de señales físicas (Estímulos de Presión), convertirlos en voltajes eléctricos y digitalizarlos de manera que puedan ser procesadas por una computadora o PAC.

Es fundamental para esta tesis la toma de datos ya que el 90% de la información que se usara para la obtención de los resultados provienen de los experimentos realizados, los métodos que se ocupan para el análisis de datos son para el entrenamiento de redes neuronales y rutinas para el método convencional.

Para esta adquisición de datos se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecue la señal, a niveles compatibles con el elemento que se va analizar. Que hace la transformación a señal digital, siendo el elemento, el módulo de digitalización, la adquisición de datos (DAQ) para este sistema es el proceso de medir con una herramienta computacional (en este caso Matlab) un fenómeno Eléctrico como voltaje, ocasionado por un estímulo de presión en una determinada área del sensor blando, para el cual se utilizó dos microcontroladores Arduino Mega para el proceso de toma de datos. (ver figura 48)

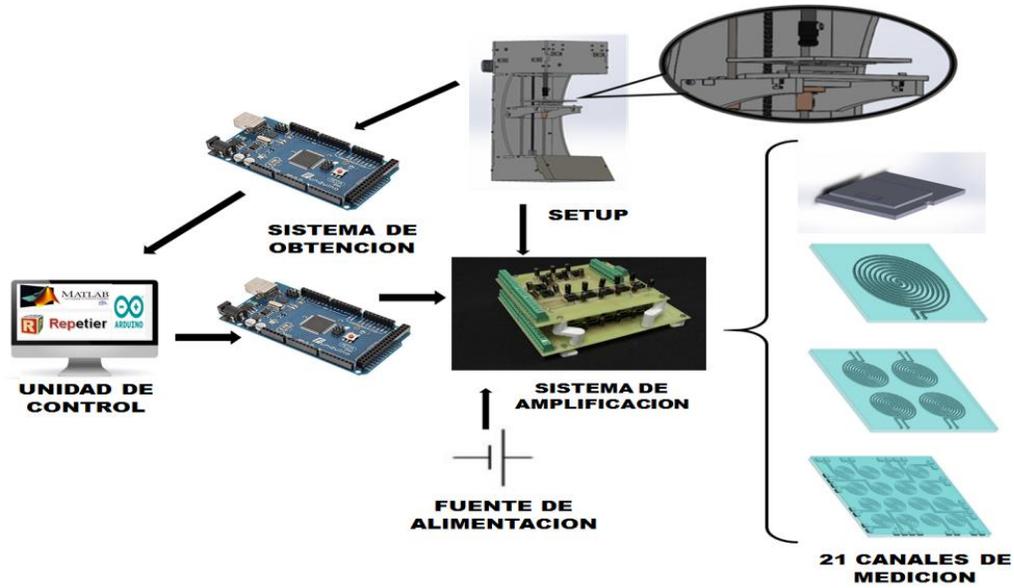


Figura 48. Esquema del proceso de adquisición de datos

El proceso de adquisición de datos se inicia con el estímulo táctil o deformación de los 22 canales de medición (21 sensores y 01 balanza), posteriormente pasan por un amplificador de señal para aumentar las señales bajas y el arduino tenga la capacidad de obtener los datos de manera óptima, para hacer una buena lectura de las señales ampliadas y envíe los datos a la unidad de procesamiento de señales.

6.5.2. Funcionamiento del Instrumento de medición

El control de nuestro instrumento de medición será a través de gcode (Lenguaje de programación más usado en control numérico, para maquinas CNC), que usará el software Repetier host, programa que se utiliza para el control de impresoras 3D, el mismo que determinará las coordenadas en un plano 2D (Eje X e Y) facilitando el área de resolución espacial de la superficie del sensor (30x30mm), y coordenadas en el eje Z determinando la altura de la balanza el cual facilita el rango de presión al que va estar sometido nuestro sensor blando, donde cuyo valor oscila entre 3cm y 15 cm.

La finalidad de controlar nuestro instrumento de medición, es poder corroborar que nuestro sensor blando actué dentro de un rango de presión el cual nosotros hemos determinado arbitrariamente de acuerdo a la altura que tiene la balanza en el eje Z, y así mismo poder corroborar la ubicación del estímulo táctil en las coordenadas X e Y, el cual también determinamos arbitrariamente dentro de la superficie del sensor.

6.5.2.1. Pruebas de Presión Normal.

Este tipo de prueba consiste en utilizar el instrumento de medición (particularmente el pulsador) como a continuación se indica:

- Hacer mediciones con presiones intermedias sin saturar ningún sensor.

- Realizar rutinas simples de poca duración de tiempo para el estudio del sensor.
- Realizar rutinas que no desgasten el cuerpo del sensor blando. (ver figura 49)

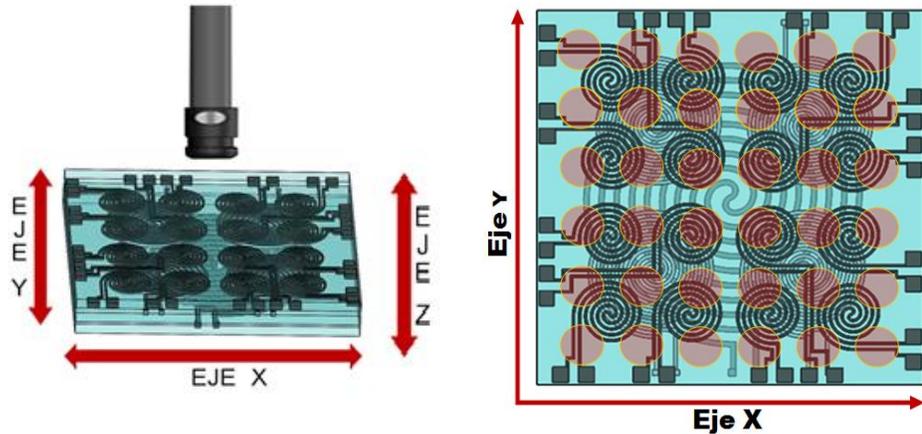


Figura 49. Estímulo de presión convencional
 El grafico muestra en el lado Izquierdo el estímulo del pulsador sobre la superficie del sensor, en el lado derecho se aprecia el área donde nuestro pulsador es capaz de sensor.

6.5.2.2. Prueba de saturación del estímulo de Presión.

Este tipo de prueba consiste en utilizar el instrumento de medición (particularmente el pulsador y balanza) como a continuación se indica:

- Hacer mediciones con presiones Altas hasta lograr la saturación de los sensores.
- Realizar rutinas complejas de poca duración de tiempo para el estudio del sensor.
- La frecuente realización de esta rutina ocasiona desgaste del cuerpo de sensor, como derramamiento de galinstan por los terminales del mismo. (ver figura 50)

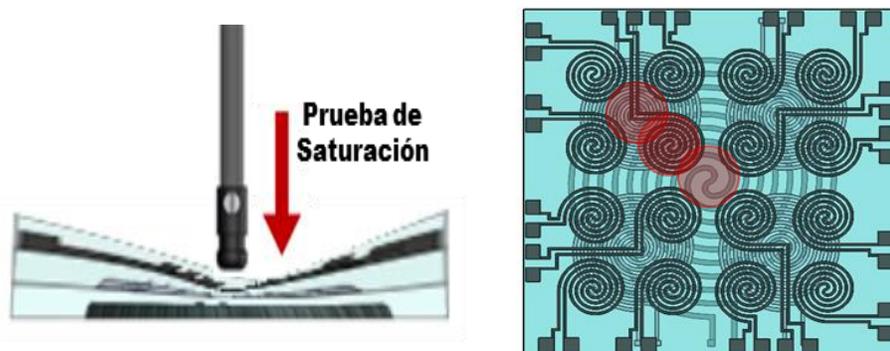


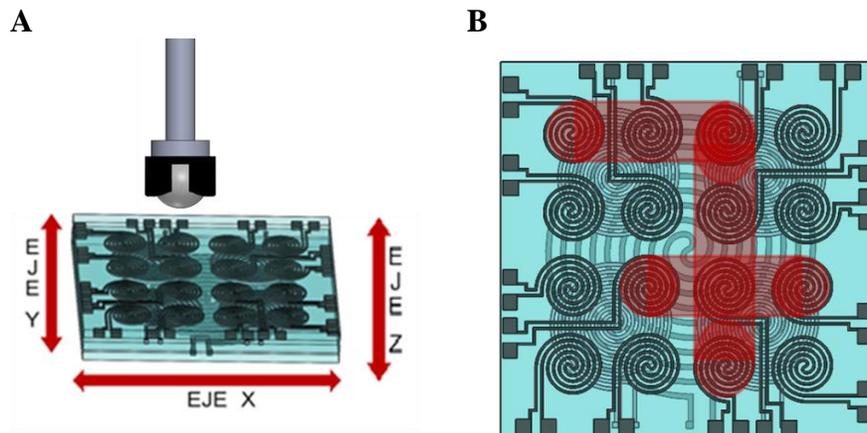
Figura 50. Prueba de saturación del sensor

En la izquierda se visualiza la prueba de saturación que el pulsador somete al sensor deformándolo hasta el máximo valor permitido, en la derecha las posiciones donde este ensayo se practica.

6.5.2.3. Para pruebas con presiones constantes. (Bola omnidireccional)

Este tipo de prueba consiste en utilizar el instrumento de medición (particularmente el pulsador y balanza) sometiendo principalmente a los 16 sensores pequeños, como a continuación se indica:

- Hacer una simulación en una matriz virtual con un modelo ON/OFF a los dieciséis sensores blandos, activando dichos sensores con un umbral de presión, de valor bajo (20 Kp).
- La característica fundamental de este tipo de prueba, es desplazar una bola omnidireccional a presión constante dentro del área del sensor (matriz de 4x4).
- Realizar rutinas complejas de corta duración de tiempo particularmente con el sensor blando pequeño que posee una matriz de 4x4.
- La frecuente realización de esta rutina ocasiona deformación del cuerpo de sensor (alargamiento), y con derramamiento de galinstan por los terminales del mismo, por el constante rozamiento que ejerce la bola en el itinerario del pulsador.
- de la matriz, el cual mediciones con presiones constantes donde todos los (altas, intermedias y bajas), y ejercer diferentes estímulos de presión en diferentes puntos dentro del área del Sensor, para entrenar la red neuronal. (ver figura 51)



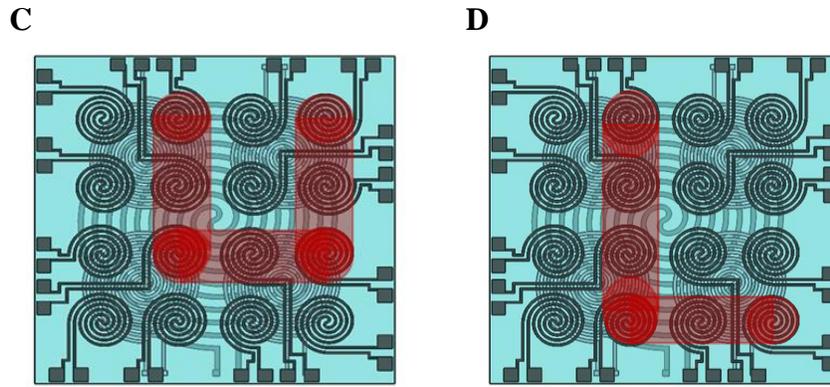


Figura 51. Prueba para estímulo con presión constante

Esta serie de imágenes corresponde al ensayo a presión constante con la bola omnidireccional (A) La imagen muestra la posición inicial de la bola omnidireccional para después colocarse sobre el sensor ejerciendo una presión constante y hacer un recorrido sobre el área del sensor, y llenándolo en los moldes impresos en 3D (B) Esta imagen representa la escritura de un número siete (7) sobre el sensor de mayor resolución (C) Esta imagen representa la escritura de una letra minúscula “u” sobre el sensor de mayor resolución (D) Esta imagen representa la escritura de la letra “L” mayúscula sobre el sensor de mayor resolución

6.5.2.4. Para entrenamiento de redes Neuronales

Este tipo de prueba consiste en utilizar el instrumento de medición (particularmente el pulsador y balanza) como a continuación se indica:

- Hacer mediciones con presiones variables (altas, intermedias y bajas), y ejercer diferentes estímulos de presión en diferentes puntos dentro del área del Sensor, para entrenar la red neuronal.
- Realizar rutinas complejas de larga duración de tiempo para es sensor blando multiescala integrado.
- La frecuente realización de esta rutina ocasiona desgaste del cuerpo de sensor (alargamiento), por como derramamiento de galinstan por los terminales del mismo.
- El alargamiento del sensor blando consiste en el aumento de área del sensor por los constantes estímulos de presión de varias rutinas para entrenar la red neuronal. (ver figura 52)

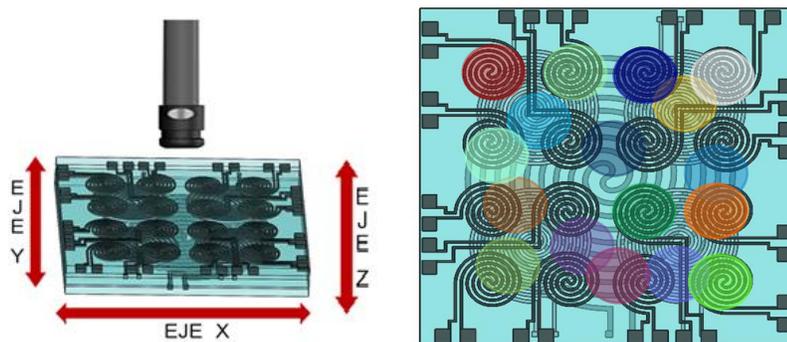


Figura 52. Prueba de entrenamiento de una red neuronal

En la izquierda se visualiza el estímulo del pulsador que somete al sensor pulsándolo a diferentes presiones y en distintos puntos del área del sensor, en la derecha se observa las posiciones aleatorias para ayudar a etiquetar toda el área del sensor.

6.6. Caracterización con el método Convencional de Análisis de Datos.

La Caracterización de los Datos resultantes por el método convencional en este tema, determinara los siguientes aspectos:

6.6.1. Caracterización de la Presión con diferentes tipos de pulsadores de igual Área.

Esta caracterización fue realizada con cuatro (04) tipos de pulsadores (Circular, Cuadrado, Triangulo, Rectángulo) que fueron confeccionados en impresión 3D, contemplando la misma área de la punta del pulsador 100 ml^2 , así mismo se realizó dicha prueba únicamente en el sensor grande, a velocidad uniforme y se realizó los siguientes tipos pruebas:

- Prueba de Presión sobre el diámetro del sensor velocidad uniforme. (ver figura 53)

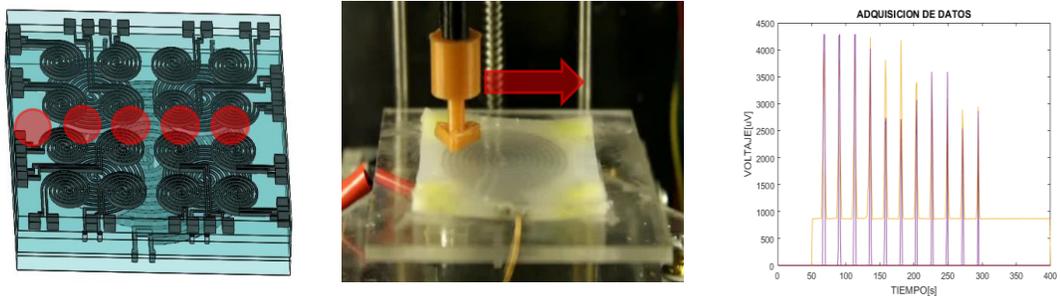


Figura 53. Prueba de presión sobre el diámetro horizontal del sensor

- Prueba para encontrar el rango de Presión máxima. (ver figura 54)

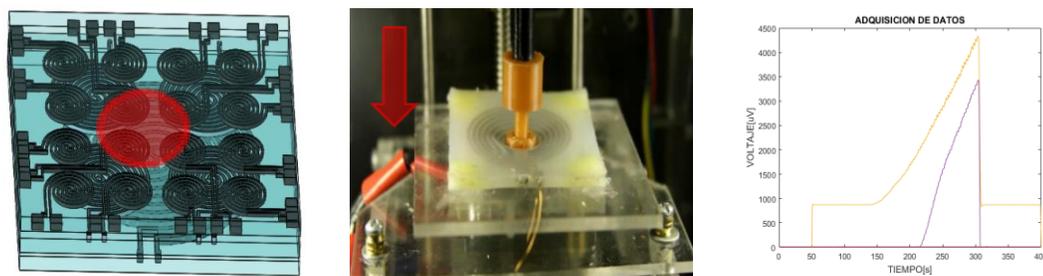
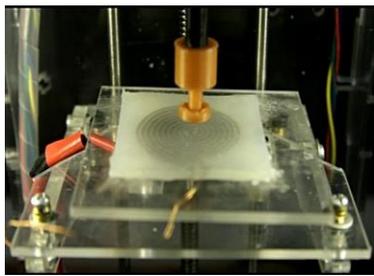
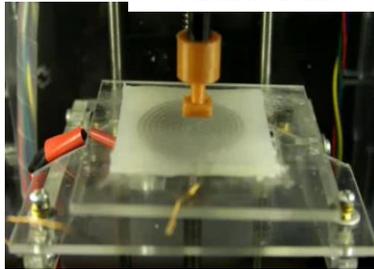
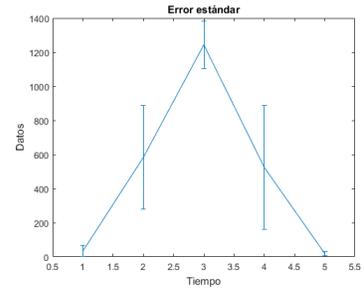
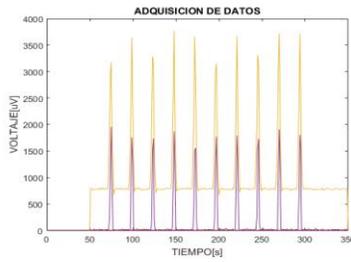


Figura 54. Prueba para encontrar el rango de presión máxima

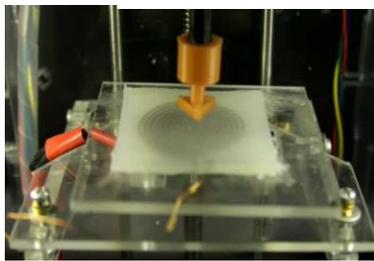
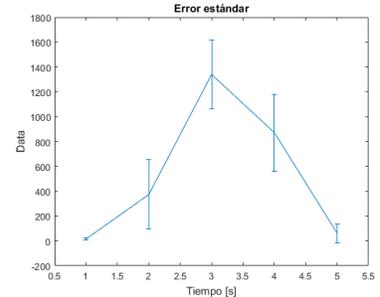
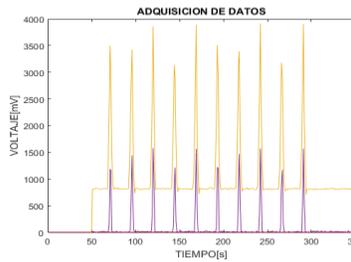
- Prueba de Presión en el punto centro del Sensor con 10 pulsaciones a velocidad uniforme. (ver figura 55)



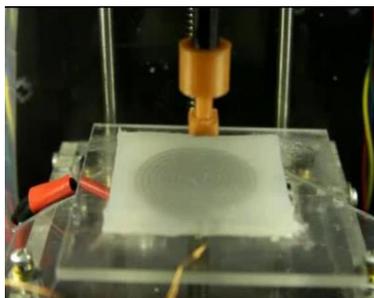
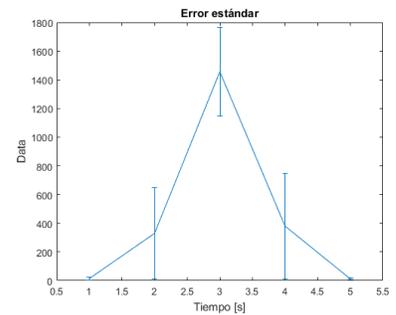
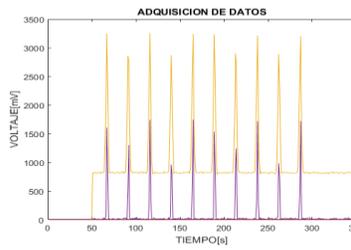
Pulsador Circular



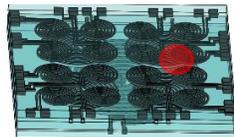
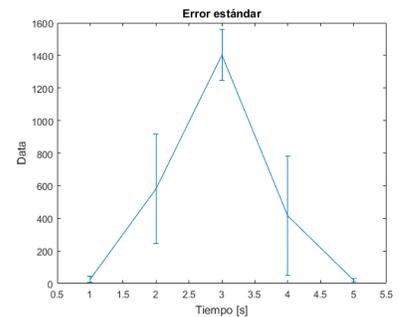
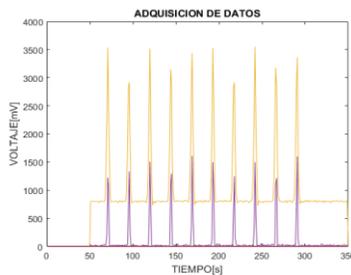
Pulsador Cuadrado



Pulsador Triangular



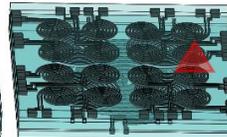
Pulsador Rectangular



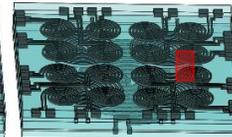
Pulsador Circular



Pulsador Cuadrado



Pulsador Triangular



Pulsador Rectangular

Figura 55. Prueba de presión con diferente forma geométrica de la punta del pulsador
 En esta sección se hizo todos los ensayos realizados con pulsadores de diferente Figura geométrica (cuadrado, rectángulo, triangulo y circular, pero con la misma área de 10 mm^2).

6.6.2. Caracterización de la Presión con un pulsador circular a diferentes áreas.

Esta caracterización fue realizada con cuatro (04) tipos de pulsadores Circular de las siguientes medidas (6, 9, 12 y 15 mm de diámetro) que fueron confeccionados en impresión 3D, contemplando diferente área de la punta del pulsador, así mismo se realizó dicha prueba únicamente en el sensor grande, a velocidad uniforme y se realizó los siguientes tipos pruebas:

- Prueba de Presión sobre el diámetro del sensor velocidad uniforme. (ver figura 56)

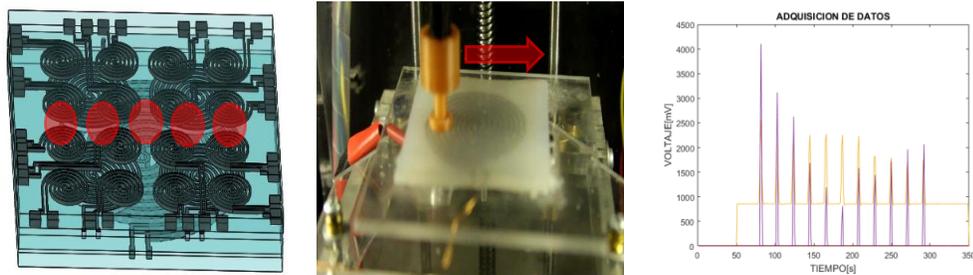


Figura 56. Prueba de presión sobre el diámetro horizontal con un pulsador circular de 9mm

- Prueba para encontrar el rango de Presión máxima (ver figura 57).

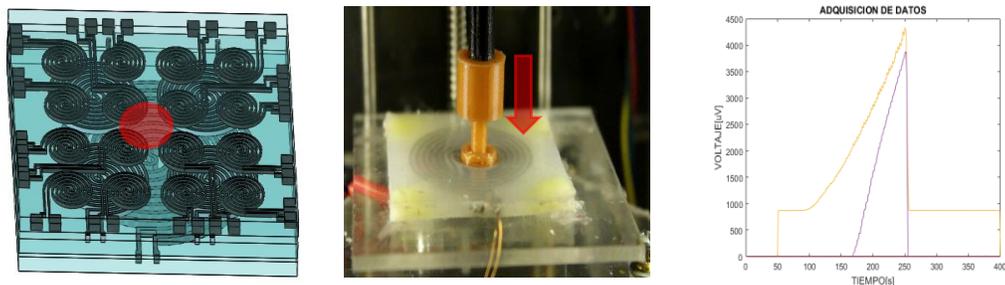


Figura 57. Prueba para encontrar el rango de presión máxima con pulsador circular de 9mm

- Prueba de Presión en el punto centro del Sensor con 10 pulsaciones a velocidad uniforme. (ver figura 58)

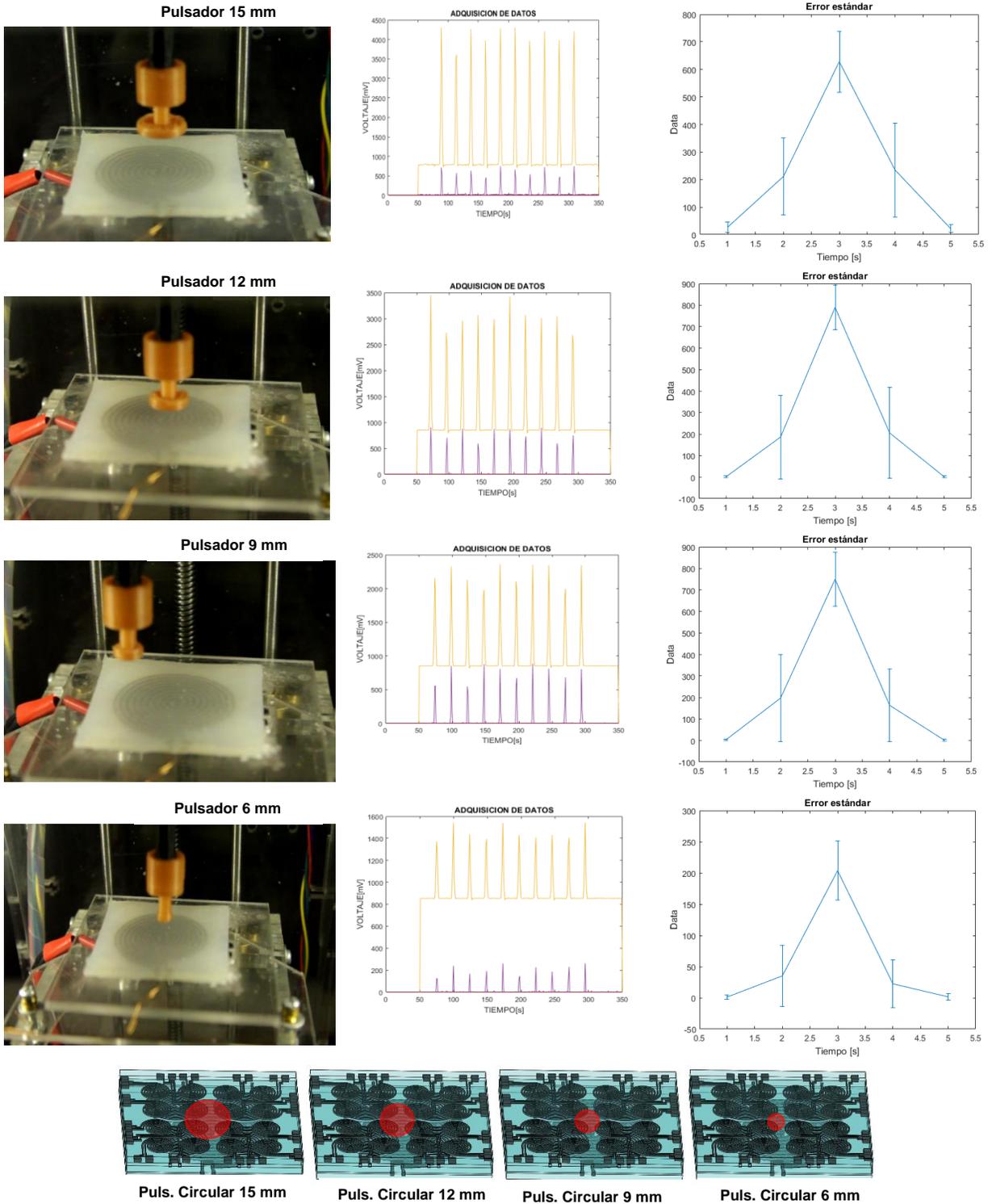


Figura 58. Prueba de presión en el centro del sensor con 10 repeticiones con diferentes áreas del pulsador circular

En esta sección se hizo todos los ensayos realizados con pulsadores de diferente igual forma geométrica (circular), pero con las diferentes áreas en la punta del sensor (15, 12, 9, 6).

6.6.3. Caracterización del Desplazamiento del pulsador a presión Constante.

La caracterización de esta Rutina de presión constante, con el pulsador de bola omnidireccional se realizó enfatizando la construcción de diferentes dibujos como letras y números. La cual tenía como finalidad usar el sensor pequeño como una pantalla Táctil. Este experimento fue concebido por un código en Matlab que mostraba una matriz virtual de 4x4, que representaban los 16 sensores, que fueron interruptores digitales que se activaban con un umbral 45 Kp. de Presión. (ver figura 59)

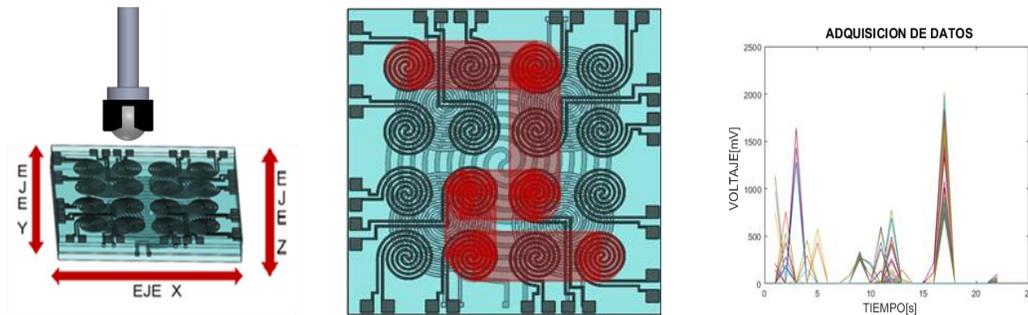


Figura 59. Prueba del pulsador a presión constante (bola omnidireccional)

6.7. Resultado con el método de caracterización convencional (ver figura 60, 61,62)

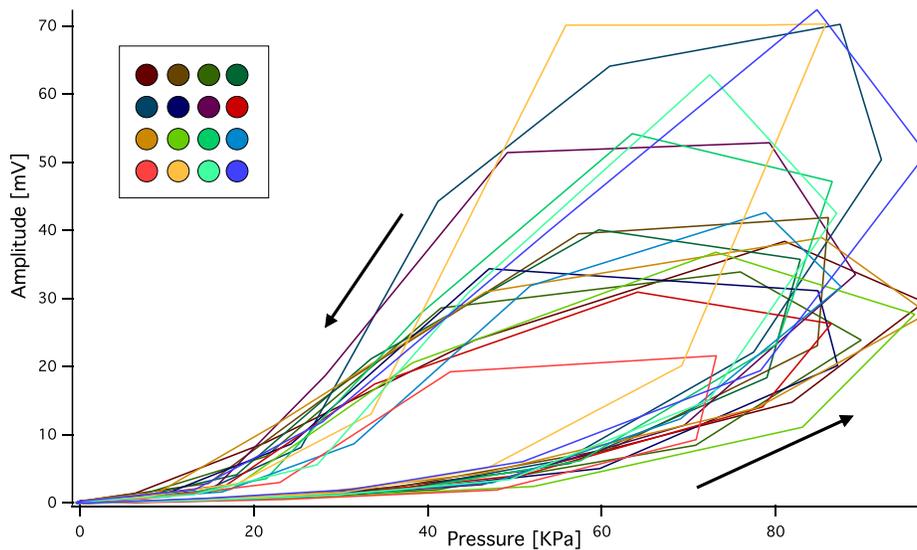


Figura 60. Amplitud vs Presión, de la curva de histéresis, para los sensores pequeños. Este resultado con el método convencional muestra las curvas de histéresis del sensor pequeño, que dispone de 16 canales de medición el cual se aprecia todos significativamente diferentes.

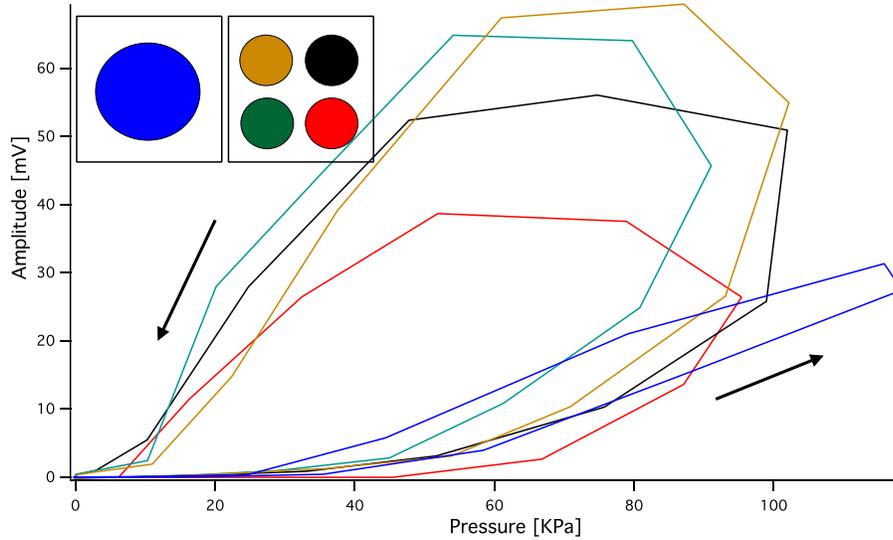


Figura 61. Amplitud vs Presión, de la curva de histéresis, para los sensores medianos
 Este resultado con el método convencional muestra las curvas de histéresis de los sensores mediano y grande de manera independiente, notando la baja histéresis del sensor grande.

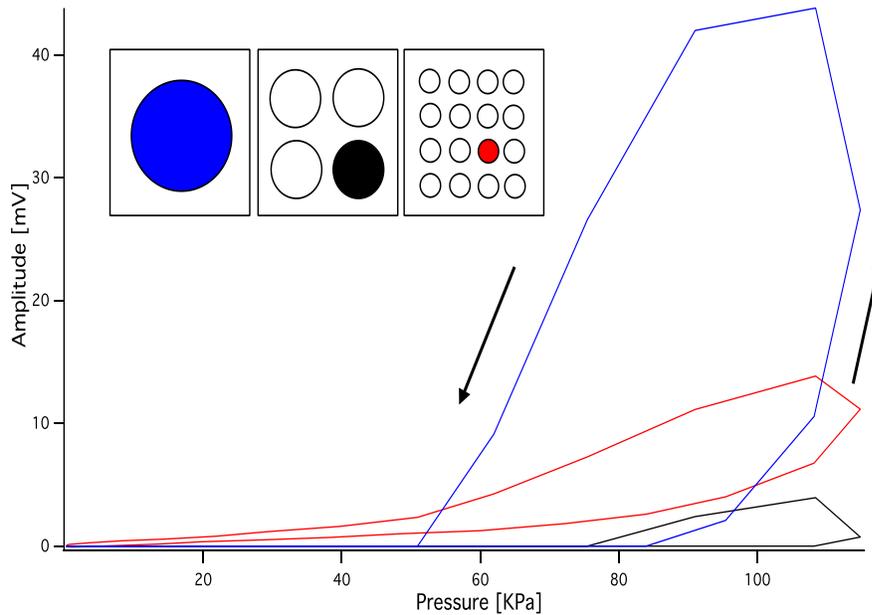


Figura 62. Amplitud vs Presión, de la curva de histéresis, para los 3 tamaños de sensores
 Este resultado con el método convencional muestra las curvas de histéresis de los sensores mediano, grande y pequeño de manera conjunta, cuyos sensores se encuentran en el siguiente orden sensor blando Grande, mediano y pequeño, donde podemos apreciar que existen cambios en la curva de histéresis de los sensores.

6.8. Caracterización con el Método de redes neuronales artificiales

Para la caracterización de nuestro sensor se tuvo en consideración, evaluar con el método de redes neuronales artificiales por lo tanto se usa la red neuronal del software Matlab, la cual se diseñó para encontrar un amplio rango de presión del sensor ante cualquier estímulo táctil y ampliar el área de resolución espacial que se inició teniendo como base una matriz de 4 x 4. El entrenamiento se inició con una rutina de 300 pulsaciones que dura aproximadamente 1000 segundos en el eje del tiempo, las 300 pulsaciones se representan con diferentes rangos de presión y diferentes puntos sobre la superficie del sensor.

El procedimiento para implementar la primera red neuronal artificial tuvo como finalidad usar los datos de las 300 pulsaciones para obtener como resultado el rango de presión y la ubicación dentro de la superficie del sensor. Dicho análisis de datos consiste en normalizar los 21 canales puntos entre 0 y 1, para facilitar el procesamiento de los datos, separar los datos en diferentes cuadros, para las coordenadas (X, Y) y Presión.

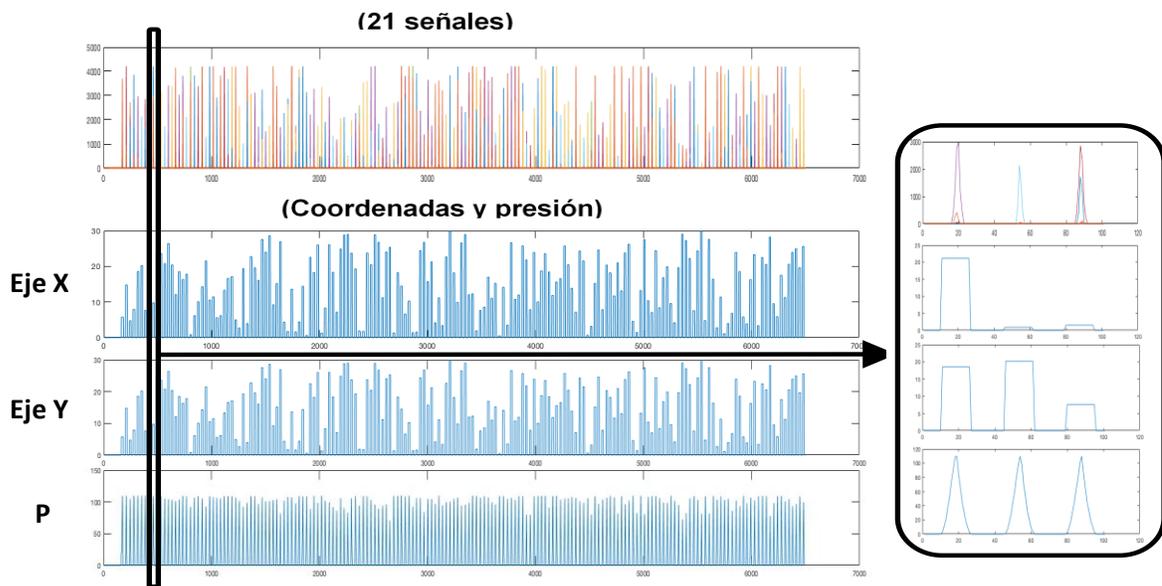


Figura 63. Proceso del análisis de datos de una rutina de red neuronal artificial evaluada a 6500 segundos con 200 pulsaciones.

En la imagen podemos apreciar una rutina de red neuronal donde se analiza los 21 canales de medición, disgregando los datos en diferentes coordenadas que son (en el eje X, eje Y), y la coordenada de la presión. E como se demuestra una época de un tiempo $T=6500$ aprox. Mostrando la relevancia de las señales.

La determinación de la primera red neuronal artificial fue configurada para insertar todos los datos resultantes de la rutina de entrenamiento, y obtener como salidas de red neuronal artificial las coordenadas (X e Y) y la presión. La cual se tuvo un alto grado error. Y para mejorar el rango de error en la obtención de resultados se optó por separar la red neuronal en dos una para cada resultado requerido, una red neuronal artificial para

obtener el rango de presión y la otra red neuronal artificial para determinar las coordenadas X e Y.

La configuración de la nueva red neuronal artificial para determinar el rango de presión del estímulo táctil a la cual el sensor es sometido, se determinó con 21 canales de entrada para la red con sus respectivos pesos asociados, y tres capas ocultas, la primera capa oculta fue con 12 neuronas y una bia determinada por el programa, la segunda capa fue con 3 neuronas de entrenamiento y una bia determinada por el programa, donde la tercera capa oculta también determinada por el programa siempre es igual al número de canales de salida y fue 1 neuronas, el cual tuvo 1 canal de salida. El programa elegido para el análisis de redes neuronales aplicado en este caso fue el software Matlab. (ver figura 63)

Esquema de red neuronal para encontrar el Rango de Presión.

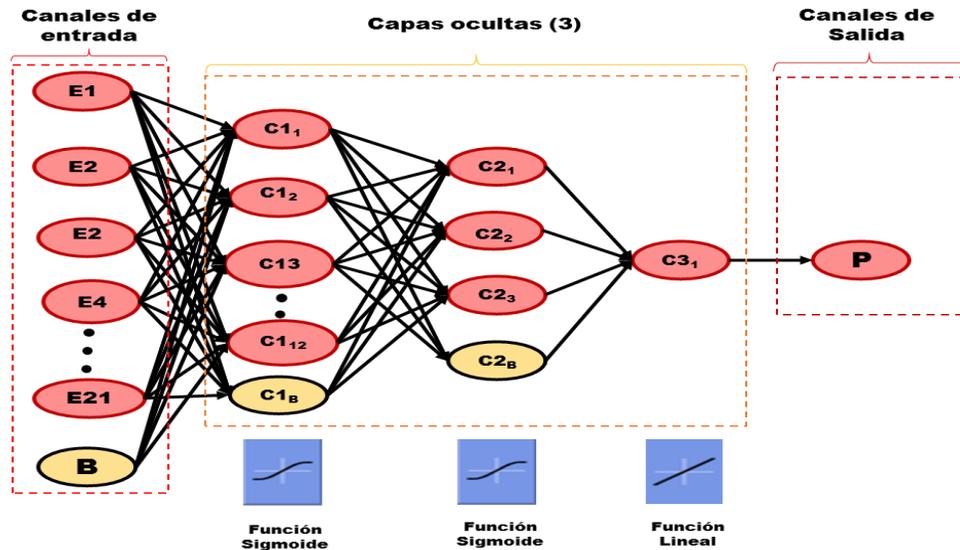


Figura 64. Esquema de red neuronal para rango de presión

En el esquema se muestra 21 canales de entrada, 3 capas ocultas, donde la primera está compuesta por 12 neuronas y una bia determinada por el programa, la segunda capa fue con 3 neuronas y una bia determinada por el programa, donde la tercera capa tiene dos neuronas la cual es determinada por el programa y siempre es igual al número de canales de salida, y 1 canales de salida que es la presión que se ejerce sobre el sensor.

La configuración de la nueva red neuronal artificial para determinar las coordenadas X e Y sobre el área de la superficie del sensor, se determinó con 21 canales de entrada para la red con sus respectivos pesos asociados, y tres capas ocultas, la primera capa oculta fue con 12 neuronas y una bia determinada por el programa, la segunda capa fue con 9 neuronas de entrenamiento y una bia determinada por el programa, donde la tercera capa oculta también determinada por el programa siempre es igual al número de canales de salida y fue 2 neuronas, el cual tuvo 2 canales de salida. El programa elegido para el análisis de redes neuronales aplicado en este caso fue el software Matlab. (ver figura 64)

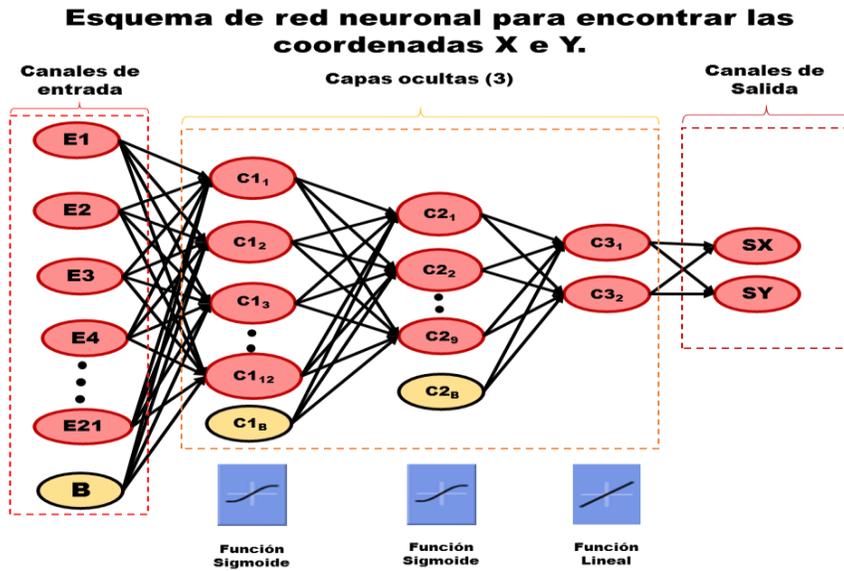


Figura 65. Esquema de red neuronal para ubicación del estímulo de presión

En el esquema se muestra 21 canales de entrada, 3 capas ocultas, donde la primera está compuesta por 12 neuronas y una bia determinada por el programa, la segunda capa fue con 9 neuronas y una bia determinada por el programa, donde la tercera capa tiene dos neuronas la cual es determinada por el programa y siempre es igual al número de canales de salida, y 2 canales de salida

La caracterización de ambas redes neuronales artificiales que se ocupó para el análisis de nuestros datos fue como a continuación se indica:

La primera red neuronal se ocupó para determinar el mínimo y máximo valor de rango del estímulo táctil que se ejerce sobre la superficie del sensor. (ver figura 65)

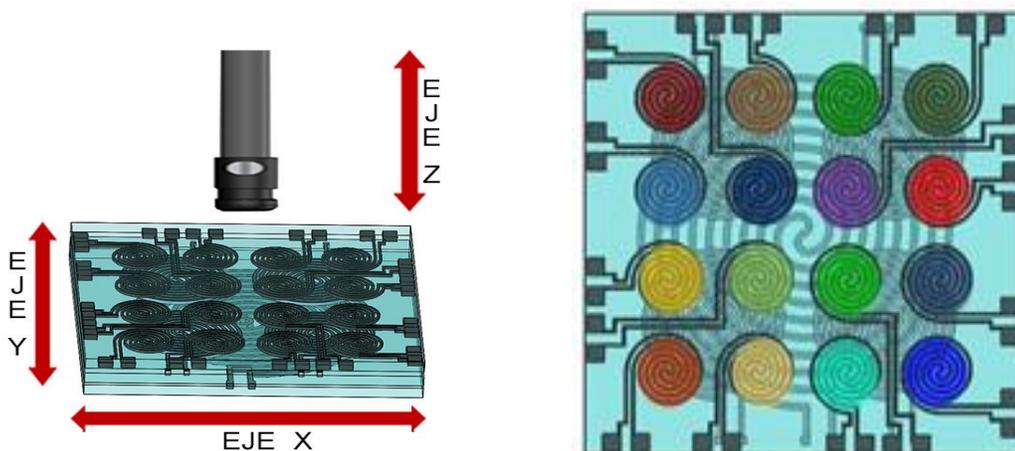


Figura 66. Resultado de la red neuronal para el rango de presión

En la izquierda se visualiza el estímulo del pulsador que somete al sensor pulsándolo a diferentes presiones y en distintos puntos del área del sensor, en la derecha se observa las posiciones de las diferentes pulsaciones representados con diferentes colores (cada color una valor de presión diferente).

La segunda red neuronal se ocupó para determinar la ubicación del estímulo táctil en las coordenadas X e Y de la superficie del sensor. (ver figura 66)

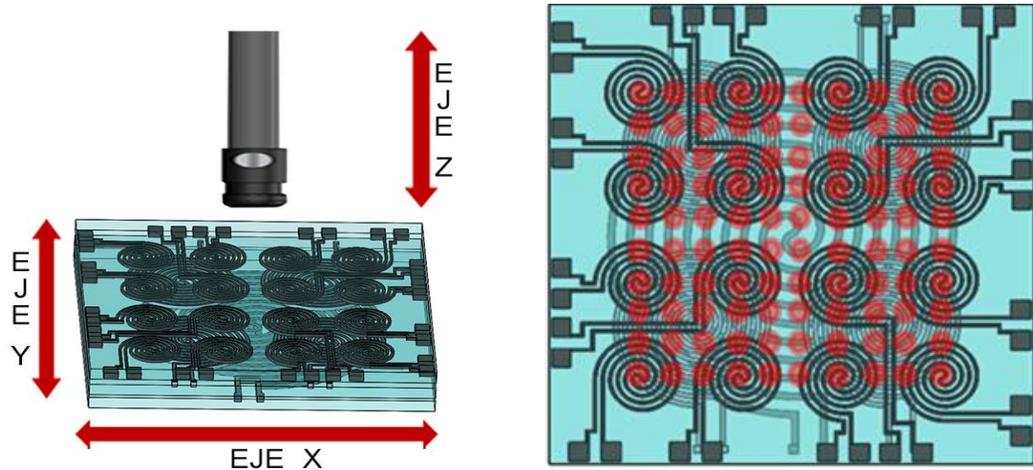


Figura 67. Resultado de la red neuronal para el estímulo de presión
En la izquierda se visualiza el estímulo del pulsador que somete al sensor pulsándolo en toda el área de resolución de la superficie del sensor, en la derecha se muestra el área de resolución espacial (10 x 10) del sensor con ayuda de la red neuronal artificial.

6.8. Los resultados obtenidos con nuestra red neuronal artificial son:

Para la configuración de este resultado primero se usó un primer set de datos (datos de entrenamiento), se tuvo que normalizar primero los datos de los 21 canales con sus respectivos pesos asociados, entre 10 y 40 unidades (que son los 30 mm de lado del sensor), y luego comparar con el target donde saldrá un error, y luego se constatará ese error con un segundo set de datos que se denominará la validación. (fig. 64) y luego se contrastará con un tercer set de datos que será el test, de la red neuronal. y se compara los resultados de la red con las coordenadas del target (línea diagonal negra) para las coordenadas X e Y.

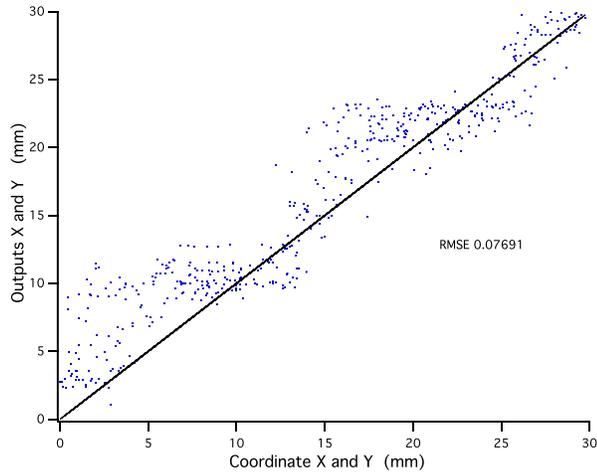


Figura 68. Error cuadrático medio. Output (línea negra) vs Resultado del entrenamiento (puntos azules)

En la imagen muestra la identificación de las 300 pulsaciones (puntos azules) del out put para las coordenadas X e Y, donde se muestra que muestra una diferencia de error con respecto a la señal del target (línea diagonal negra). La distancia entre el punto azul y la línea diagonal negra es el error en distancia (mm) con respecto al punto real.

Para la configuración de este resultado primero se usó los datos de entrenamiento que sirve para el aprendizaje de la red y ajustar parámetros del clasificador, luego se trabaja con el segundo set de datos que es la validación, el cual se utiliza para sintonizar los parámetros del clasificador. y para finalizar se insertan los datos de prueba o test que se utilizan para evaluar el rendimiento del clasificado capacitado. El cual señala que el conjunto de validación se utiliza para seleccionar el modelo final, e indica que no se debe ajustarse más el modelo. (fig. 69), teniendo como valor mínimo de error 0.00062311 en la época 92 del entrenamiento.

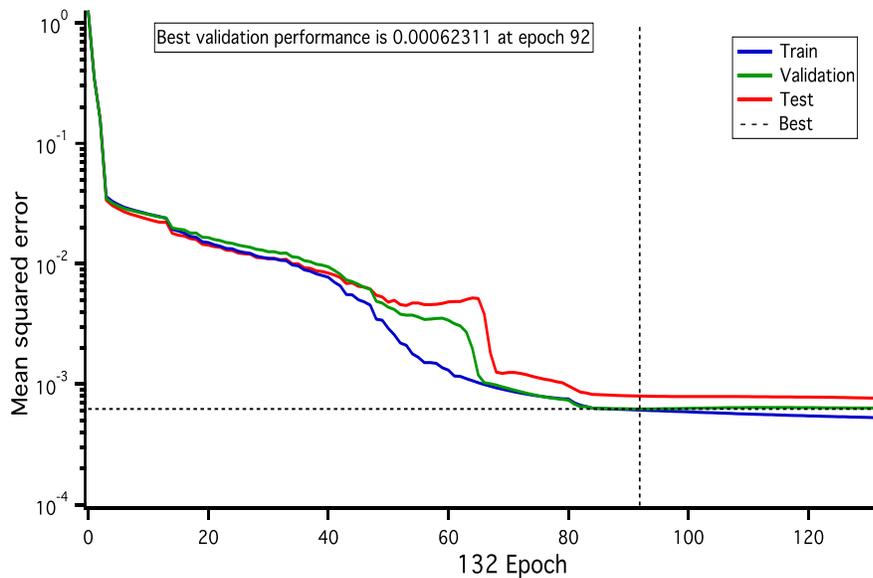


Figura 69. Validación del entrenamiento de la red neuronal.

En la imagen muestra la mejor validación del entrenamiento de la red neuronal que tiende a 0 y muestra el mínimo valor de error de la validación que es 0.00062311 en la época 92. De 132 épocas en la que consistió todos nuestros entrenamientos.

Los resultados del grafico de presión máxima se muestran para todos los tipos de sensores(Sensor grande, mediano y los tres tipos de sensores pequeños) (ver figura 70)

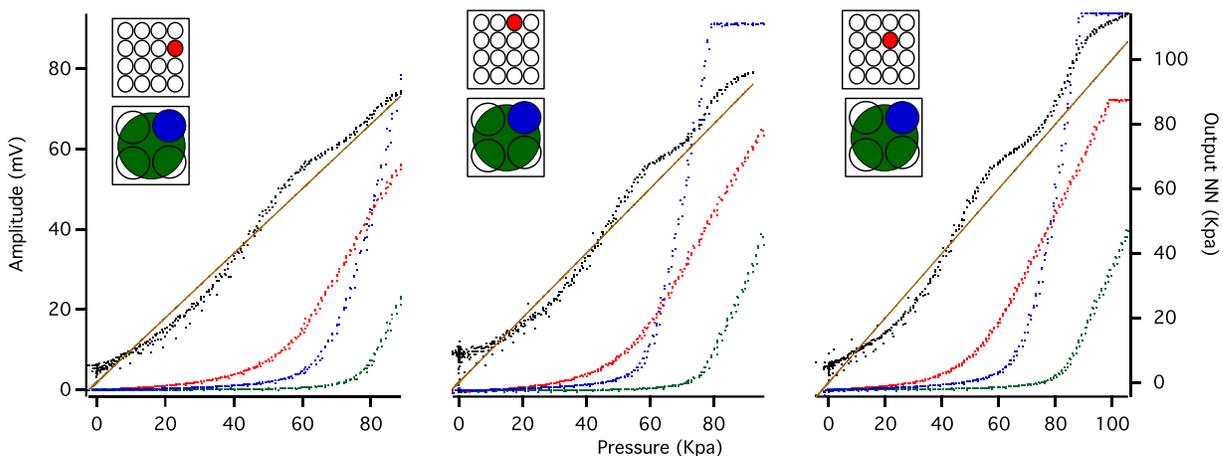


Figura 70. Saturación del sensor integrado

En las imágenes se aprecian las pruebas de saturación de todos los sensores teniendo en consideración que existen tres tipos de sensores chicos, el sensor mediano y el sensor grande.

Esta imagen muestra una ampliación del gráfico de la Fig. 70 el primero de la izquierda, se reconoce que en este grafico se nota claramente que nuestro sensor integrado es sensible para bajas presiones y para altas presiones, resultado de la prueba de saturación. hasta una amplitud de 10 mV. y 80 Kp. (ver figura 70)

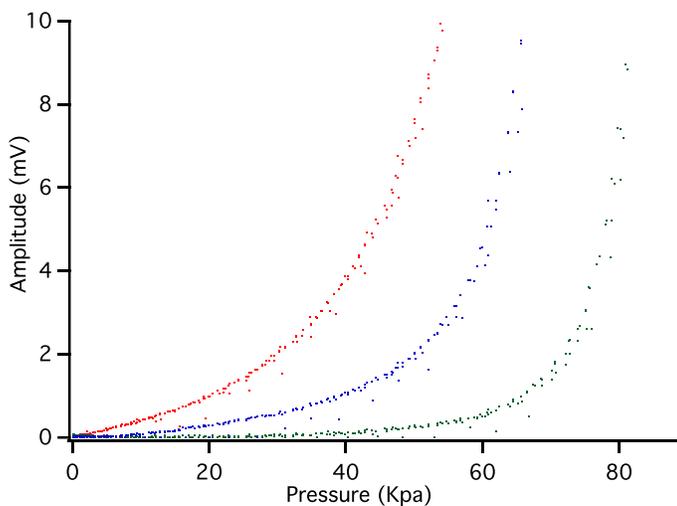


Figura 71. Imagen ampliada del primer grafico de saturación

En las imágenes se aprecian la prueba de saturación del sensor más pequeño de los tres tipos de los sensores, y se visualiza un resultado de acuerdo a la literatura.

Se aprecia las 100 coordenadas sobre la superficie del sensor, en cada coordenada hay tres presiones distintas. Y el tamaño del error de los cuadrados es el promedio del error absoluto en cada coordenada de la resta de los tres valores que le compete a cada punto. Considerando. Que el tamaño de cuadrado con mayor error es 4.20 mm (menos que la distancia de un sensor chico) y el error mínimo es 0.15 mm.

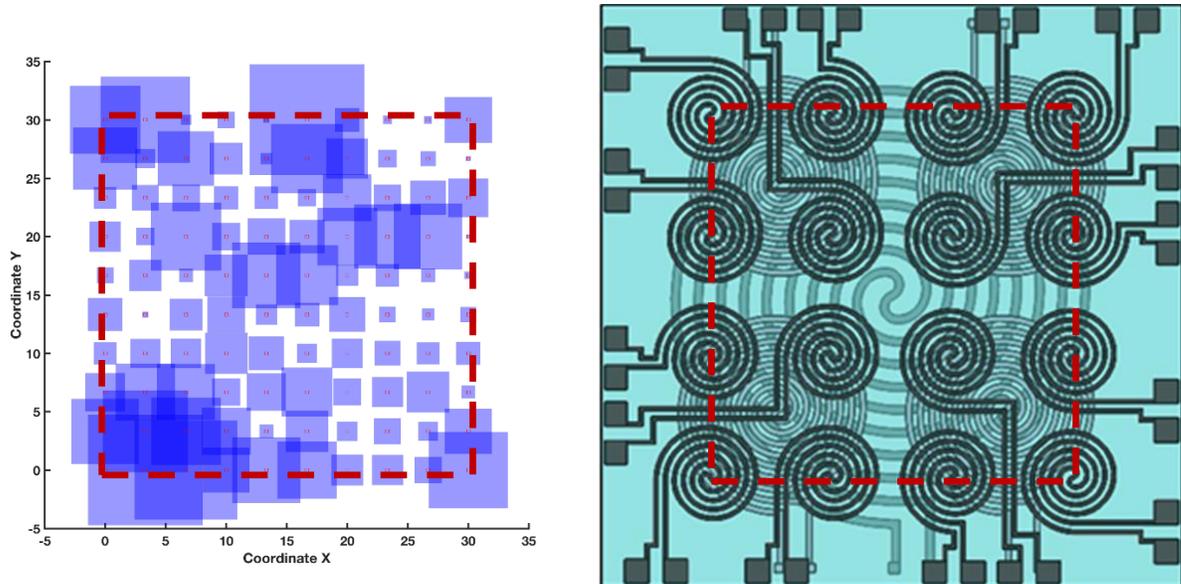


Figura 72. Área de resolución del sensor blando multiescala

En las imágenes se aprecian el mapeo de la matriz más grande que tuvo como resultado el experimento, con ayuda de redes neuronales que amplió el área de resolución hasta una matriz de 10 x 10.

Capítulo 7: Conclusiones.

1. Se cumplieron todos los objetivos de la tesis
2. Fue posible validar las hipótesis del trabajo.
3. Fue posible de construir un sensor integrado que tiene un amplio rango de medición y posea buena sensibilidad.
4. Es notable observar que fue posible doblar la resolución espacial propia de la capa de mayor resolución física.
5. En una red neuronal simple como la usada en este trabajo demostró un mayor desempeño que el uso de Deep Learning como se ha intentado en trabajos similares.

Bibliografía

- [1] K. O. Stanley y R. Miikkulainen, «Evolving neural networks through augmenting topologies,» *Evolutionary computation*, vol. 10, nº 2, pp. 99-127, 2002.
- [2] M. Asada, K. F. MacDorman, H. Ishiguro y Y. Kuniyoshi, «Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots,» *Robotics and Autonomous System*, vol. 37, nº 2, pp. 185-193, 2001.
- [3] S. Ji, W. Xu, M. Yang y K. Yu, «3D convolutional neural networks for human action recognition,» *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 35, nº 1, pp. 221-231, 2013.
- [4] D. Rus y M. T. Tolley, «Design, fabrication and control of soft robots,» *Nature*, vol. 521, nº 7553, pp. 467-475, 2015.
- [5] J. Yin, V. J. Santos y J. D. Posner, «Bioinspired flexible microfluidic shear force sensor skin,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 264, pp. 289-297, 2017.
- [6] Y. L. Park, B. R. Chen and R. J. Wood, "Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 8, pp. 2711-2718, 2012.
- [7] T. Someya, T. Sekitani, S. Iba, Y. Kato, H. Kawaguchi y T. Sakurai, «A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications,» *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 101, nº 27, pp. 9966-9970, 2004.
- [8] I. V. Yannas y J. F. Burke, «Design of an artificial skin. I. Basic design principles,» *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, vol. 14, nº 1, pp. 65-81, 1980.
- [9] C. Larson, J. Spjut, R. Knepper y R. Shepherd, «Orb Touch: Recognizing Human Touch in Deformable Interfaces with Deep Neural Networks.,» *arXiv preprint arXiv:1706.02542*.
- [10] J. B. Chossat, Y. Tao, V. Duchaine y Y. L. Park, «Wearable soft artificial skin for hand motion detection with embedded microfluidic strain sensing,» *Robotics and Automation (ICRA) 2015 IEEE International Conference*, pp. 2568-2573, May 2015.
- [11] C. Larson, B. Peele, S. Li, S. Robinson, M. Totaro, L. Beccai y R. Shepherd, «Highly stretchable electroluminescent skin for optical signaling and tactile sensing,» *Science*, vol. 351, nº 6277, pp. 1071-1074, 2016.
- [12] A. Vedaldi y K. Lenc, «Matconvnet: Convolutional neural networks for matlab.,» *Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia*, pp. 689-692, October 2015.
- [13] J. B. Chossat, Y. L. Park, R. J. Wood y V. Duchaine, «A soft strain sensor based on ionic and metal liquids,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, nº 9, pp. 3405-3414, 2013.
- [14] Y. Xia y G. M. Whitesides, «Soft lithography,» *Annual review of materials science*, vol. 28, nº 1, pp. 153-184, 1998.
- [15] Y. L. Park, C. Majidi, R. Kramer, P. Bérard y R. J. Wood, «Hyperelastic pressure sensing with a liquid-embedded elastomer,» *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, nº 12, 2010.

- [16] M. N. Kashid, A. Renken y L. Kiwi-Minsker, «Influence of flow regime on mass transfer in different types of microchannels,» *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 50, nº 11, pp. 6906-6914, 2011.
- [17] A. Tabatabai, A. Fassler, C. Usiak y C. Majidi, «Liquid-phase gallium-indium alloy electronics with microcontact printing,» *Langmuir*, vol. 29, nº 20, pp. 6194-6200, 2013.
- [18] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier y I. D. Walker, «Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future reasearch,» *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 5, nº 3, pp. 99-117, 2008.
- [19] S. G. Kandlikar, «Microchannels and minichannels: history, terminology, classification and current research needs,» *ASME 2003 1st International Conference on Microchannels and Minichannels*, pp. 1-6, January 2003.
- [20] Y. Kim, «Convolutional neural networks for sentence classification,» *arXiv preprint arXiv:1408.5882*.
- [21] T. E. Menke y P. S. Maybeck, «Sensor/actuator failure detection in the Vista F-16 by multiple model adaptative estimation,» *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, vol. 31, nº 4, pp. 1218-1229, 1995.
- [22] D. Kingma y J. Ba, «Adam: A method for stochastic optimization,» *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.
- [23] F. G. Shellock, S. Morisoli y E. Kanal, «MR procedure and biomedical implants, materials, and devices: 1993 update,» *Radiology*, vol. 189, nº 2, pp. 587-599, 1993.
- [24] S. J. Clarson y J. A. Semlyen, «Siloxane polymers,» *Prentice Hall*.
- [25] C. Keplinger, J. Y. Sun, C. C. Foo, P. Rothmund, G. M. Whitesides y Z. Suo, «Stretchable, transparent, ionic conductors,» *Science*, vol. 341, nº 6149, pp. 984-987, 2013.
- [26] T. L. Anderson, «Fracture mechanics: fundamentals and applications,» *CRC press*.
- [27] J. Blake y H. B. Gurocak, «Haptic glove with MR brakes for virtual reality,» *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 14, nº 5, pp. 606-615, 2009.
- [28] Y. Kurosaki, Y. Shimizu, K. Miyagawa, K. Kanoda y G. Saito, «Mott Transition from a Spin Liquid to a Fermi Liquid in the Spin-Frustrated Organic Conductor κ -(ET)₂Cu₂(CN)₃,» *Physical review letters*, vol. 95, nº 17, 2005.
- [29] S. Wagner y S. Bauer, «Materials for stretchable electronics,» *Mrs Bulletin*, vol. 37, nº 3, pp. 207-213, 2012.
- [30] Y. Chen, Y. Xu, K. Zhao, X. Wan, J. . Deng y W. Yan, «Towards flexible all-carbon electronics: Flexible organic field-effect transistors and inverter circuits using solution processed all-graphene source/drain/gate electrodes,» *Nano Research*, vol. 3, nº 10, pp. 714-721, 2010.
- [31] D. M. Vogt, Y. L. Park y R. J. Wood, «Design and characterization of a soft multi-axis force sensor using embedded microfluidic channels,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, nº 10, pp. 4056-4064, 2013.

- [32] E. Delamarche, H. Schmid, B. Michel y H. Biebuyck, «Stability of molded polydimethylsiloxane microstructures,» *Advanced Materials*, vol. 9, nº 9, pp. 741-746, 1997.
- [33] Y. Xia, E. Kim, X. M. Zhao, J. A. Rogers, M. Prentiss y G. M. Whitesides, «Complex optical surfaces formed by replica molding against elastomeric masters,» *Science*, pp. 347-349, 1996.
- [34] W. P. Eaton y J. H. Smith, «Micromachined pressure sensors: review and recent developments,» *Smart Materials and Structures*, vol. 6, nº 5, p. 530, 1997.
- [35] G. R. Irwin, P. C. Paris y H. Tada, «The stress analysis of cracks handbook,» *American Society of Mechanical Engineers*, 2000.
- [36] J. G. Elias, W. C. Westerman y M. M. Haggerty, «U.S. Patent No. 7,840,912,» *U.S. Patent and Trademark Office*, 2009.
- [37] C. . Harrison y S. E. Hudson, «Providing dynamically changeable physical buttons on a visual display,» *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 299-308, April 2099.
- [38] J. Lee, M. C. Lee, H. Liu y J. H. Ryu, «Intelligent robotics and applications,» *6th International Conference, ICIRA Busan*, pp. 25-28, 2011.
- [39] M. S. Arnold, A. A. Green, J. F. Hulvat, S. I. Stupp y M. C. Hersam, «Sorting carbon nanotubes by electronic structure using density differentiation,» *Nature nanotechnology*, vol. 1, nº 1, pp. 60-65, 2006.