

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SENSADO TÁCTIL PARA
PRÓTESIS O MANOS ROBÓTICAS**

CODIGO DEL PROYECTO: PG-20-1-04



WILLIAM ALEJANDRO MEDINA CRISTIANO

CODIGO: 1620716

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1121946803

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ, D.C.
2022**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SENSADO TÁCTIL PARA
PRÓTESIS O MANOS ROBÓTICAS**

WILLIAM ALEJANDRO MEDINA CRISTIANO

CODIGO: 1620716

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1121946803

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
MECATRÓNICO DE LA UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA**

DIRECTOR:

M.Sc NÉSTOR FERNANDO PENAGOS QUINTERO

Ing. en electrónica

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ, D.C.**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez realizada la revisión metodológica y técnica del documento final de proyecto de grado, doy constancia de que el (los) estudiante (s) ha cumplido a cabalidad con los objetivos propuestos, cumple a cabalidad con los Lineamientos de Opción de Grado vigentes del programa de Ingeniería Mecatrónica y con las leyes de derechos de autor de la República de Colombia, por tanto, se encuentra(n) preparado(s) para la defensa del mismo ante un jurado evaluador que considere idóneo el Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Piloto de Colombia.



Néstor Fernando Penagos Quintero
Director del Proyecto

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mis padres por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron. Agradecerle al Ingeniero David Herrera que me guio en los inicios del desarrollo de este proyecto dentro del semillero de investigación. Finalmente quiero expresar mi agradecimiento a mi director de tesis el Ingeniero Néstor Penagos, principal colaborador durante este proceso, quien, con su dirección, conocimiento y colaboración permitió la culminación de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

NOTA DE ACEPTACIÓN	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE ILUSTRACIONES	7
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE ANEXOS	10
INTRODUCCIÓN	11
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1.1. Antecedentes del problema.....	14
1.1.2. Descripción del problema.....	14
1.1.3. Formulación del problema.....	14
1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.3. OBJETIVOS.....	15
1.3.1. Objetivos generales	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
1.4. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO.....	15
1.4.1. Alcances y limitaciones	15
1.5. MARCO REFERENCIAL.....	16
1.5.1. Estado del arte.....	16
2. DESCRIPCIÓN DE PROTOTIPOS	20
2.1. MANO ROBÓTICA	20
2.2. TIPOS DE AGARRE	21
2.3. MATERIALES	23
2.3.1. Dragon Skin	23
2.3.2. PLA.....	23
3. DESARROLLO DEL PROTOTIPO 1	24
3.1. SELECCIÓN DE MATERIALES.....	24
3.2. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	25
3.3. DISEÑO DE SENSOR A BASE DE ESPUMA CONDUCTIVA	25
3.3.1. Mecanismo	25
3.3.2. Adquisición de datos.....	29
3.3.3. Desgaste del material	33
3.3.4. Acondicionamiento de señal	35
3.3.5. Filtro.....	38
3.3.6. Histéresis	41

3.3.7. Calibración del sensor.....	42
3.3.8. Diseño PCB	44
4. DESARROLLO DEL PROTOTIPO 2.....	46
4.1. SELECCIÓN DE SENSORES.....	46
4.2. SELECCIÓN DE MICROCONTROLADORES	47
4.3. DISEÑO DE SENSOR DE FUERZA RESISTIVO	48
4.3.1. Estructura	48
4.3.2. Superficie.....	49
4.3.3. Circuito eléctrico	51
4.3.4. Caracterización	53
5. DESARROLLO DE UNA MATRIZ SENSORIAL	56
5.1. SELECCIÓN DE MATERIALES.....	56
5.2. DISEÑO DE SENSOR MATRICIAL	57
5.2.1. Geometría.....	57
5.2.2. Fabricación	58
5.2.3. Caracterización del material.....	63
5.2.4. Linealización	65
5.2.5. Multiplexación	69
5.2.6. Placa electrónica.....	71
5.2.7. Software de lectura de datos.....	72
6. RESULTADOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	76
6.1. PROTOTIPO 1: SENSOR TÁCTIL CON ESPUMA CONDUCTIVA.....	76
6.2. PROTOTIPO 2: SENSOR TÁCTIL DE FUERZA RESISTIVO	80
6.3. SENSOR TÁCTIL MATRICIAL.....	83
6.4. COMPARACIÓN DE PROTOTIPOS.....	86
7. CONCLUSIONES	88
8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXO 1. PLANOS MECÁNICOS.....	94
ANEXO 2. PLANOS ELÉCTRICOS	102
ANEXO 3. ALGORITMOS.....	106
ANEXO 4. DATA SHEET	113

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Mano robótica. (14).....	20
Ilustración 2: Dedo de la mano robótica.	21
Ilustración 3: Taxonomía de agarres descrita por Cutkosky. (15).....	22
Ilustración 4: Agarres de precisión y potencia.	23
Ilustración 5: Espuma conductiva. (16)	24
Ilustración 6: Ensamblaje mecanismo sensor de espuma conductiva.	26
Ilustración 7: Instalación de tendones y espuma del sensor.....	26
Ilustración 8: Conexiones del sensor con espuma conductiva.	27
Ilustración 9: Movimiento del mecanismo del sensor.	27
Ilustración 10: Molde impreso de la yema de los dedos del sensor.....	28
Ilustración 11: Yema de los dedos del sensor de espuma conductiva.....	28
Ilustración 12: Prototipo final de sensor de espuma conductiva.	29
Ilustración 13: Divisor de voltaje.	29
Ilustración 14: Grafica de la señal adquirida del divisor de voltaje.....	31
Ilustración 15: Dinámica sistema de adquisición de señal.....	33
Ilustración 16: Grafica variación de la señal por desgaste del material.	34
Ilustración 17: Grafica resistividad del material en función de deformaciones.....	35
Ilustración 18: Amplificador no inversor.....	36
Ilustración 19: Señal amplificada.....	38
Ilustración 20: Filtro pasa bajo con diferentes frecuencias de corte.	39
Ilustración 21: Configuración filtro pasa bajo.....	40
Ilustración 22: Señal filtrada.....	40
Ilustración 23: Histéresis sensor de espuma conductiva.	41
Ilustración 24: Etapas acondicionamiento de la señal.....	43
Ilustración 25: Placa electrónica sensor con espuma conductiva.....	44
Ilustración 26: Proporción PCB sensor táctil.	45
Ilustración 27: Sensores de fuerza resistivos serie FSR400 (17).	46
Ilustración 28: Pololu A-Star 32U4 Micro. (18)	47
Ilustración 29: Estructura en 3D del sensor de fuerza resistivo.	48
Ilustración 30: Acoplamiento de estructura con sensor de fuerza resistivo.....	49
Ilustración 31: Molde impreso en 3D del sensor de fuerza resistivo.	49
Ilustración 32: Instalación de los tendones en la estructura del dedo.....	50
Ilustración 33: Proceso de curado del sensor de fuerza resistivo.....	50
Ilustración 34: Esquema eléctrico del sensor de fuerza resistivo.	51
Ilustración 35: PCB del sensor de fuerza resistivo.	52
Ilustración 36: Conexiones sistemas sensorial.....	53
Ilustración 37: Configuraciones matricial sensor táctil.....	57
Ilustración 38: Coordenadas sensor matricial.	58
Ilustración 39: Configuración matricial de la piel sensorial.	59
Ilustración 40: Capas de la matriz sensorial.....	59

Ilustración 41: Soldadura del cableado de la matriz sensorial.	60
Ilustración 42: Fijación de las capas y cableado de la matriz sensorial.	60
Ilustración 43: Molde para proceso de curado de la matriz sensorial.	61
Ilustración 44: Prototipo final matriz sensorial.	61
Ilustración 45: Dimensiones entre matriz sensorial y una mano.	62
Ilustración 46: Descripción de las diferentes capas del sensor táctil.	62
Ilustración 47: Diagrama deformación de las capas del sensor.	63
Ilustración 48: Ensayo de fuerza del sensor táctil con Velostat.	64
Ilustración 49: Grafica resistividad en función de la carga.	65
Ilustración 50: Relación entre señal No lineal y Linealizada.	67
Ilustración 51: Configuración del circuito de multiplexación.	70
Ilustración 52: PCB multiplexación del sensor matricial.	71
Ilustración 53: Proporción PCB sensor matricial.	72
Ilustración 54: Interfaz gráfica programa de lectura de datos.	73
Ilustración 55: Representación de presión leve en un punto del sensor.	74
Ilustración 56: Representación de presión moderada en un punto del sensor.	74
Ilustración 57: Mapeo de intensidad de carga de la matriz sensorial.	75
Ilustración 58: Mano robótica con sensor táctil con espuma conductiva.	76
Ilustración 59: Detección de diferentes objetos.	77
Ilustración 60: Diagrama de flujo agarre de potencia.	78
Ilustración 61: Secuencia de agarre de potencia de una esfera.	78
Ilustración 62: Secuencia de agarre de potencia de un tubo.	79
Ilustración 63: Mano robótica con sensor táctil de fuerza resistivos FSR.	80
Ilustración 64: Agarre de precisión de diferentes objetos.	80
Ilustración 65: Diagrama de flujo agarre de precisión.	82
Ilustración 66: Secuencia agarre de precisión de una esfera.	82
Ilustración 67: Mapeo de una esfera y un engranaje en la matriz sensorial.	83
Ilustración 68: Mapeo de diferentes objetos cotidianos en el sensor matricial.	84
Ilustración 69: Mapeo de un cilindro en diferentes posiciones.	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Selección espuma conductiva.	24
Tabla 2: Selección de amplificadores.	25
Tabla 3: Señal adquirida del divisor de voltaje.	30
Tabla 4: Resistividad de la espuma conductiva.	32
Tabla 5: Variación del voltaje por desgaste del material.	33
Tabla 6: Diferentes atenuaciones con respecto a la ganancia.	37
Tabla 7: Voltajes en carga y descarga.	41
Tabla 8: Detección de cargas con respecto a la sensibilidad.	43
Tabla 9: Selección sensor de fuerza resistivo.	46
Tabla 10: Selección de microcontroladores.	47
Tabla 11: Medición de masa en función de voltaje y resistividad.	53
Tabla 12: Valores teóricos y prácticos de la caracterización del sensor.	55
Tabla 13: Selección material piezorresistivo.	56
Tabla 14: Resistividad en función de la carga del sensor táctil con Velostat.	64
Tabla 15: Resistividad linealizada.	66
Tabla 16: Voltaje de salida del sensor en función de la carga.	68
Tabla 17: Valores Teóricos y reales de la caracterización del sensor.	69
Tabla 18: Cantidad de puertos necesarios para diferentes matrices.	71
Tabla 19: Señal de salida agarre de precisión prototipo 1.	77
Tabla 20: Señal de salida agarre de potencia.	79
Tabla 21: Señal de salida agarre de precisión prototipo 2.	81
Tabla 22: Definición de zonas de intensidad del sensor matricial.	85
Tabla 23: Comparación de prototipos.	86
Tabla 24: Comparación materiales piezorresistivos.	87

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. PLANOS MECÁNICOS
ANEXO B. PLANOS ELÉCTRICOS
ANEXO C. ALGORITMOS
ANEXO D. DATA SHEET

INTRODUCCIÓN

Los dedos de una mano humana permiten sentir, detectar, prensar y manipular la superficie de un material, debido a sus terminales nerviosas que transmiten las diferentes características al cerebro humano conllevando al movimiento de los tendones de los dedos en la manipulación física de un objeto. El sentido del tacto permite determinar las dimensiones de un cuerpo para poder realizar diferentes agarres que se adapten a la geometría del objeto manipulado. La mayor sensibilidad al tacto en el cuerpo humano se presenta en la mano, especialmente en la palma y yema de los dedos. Se pretende replicar esa sensibilidad de la mano del hombre, en la parte de detección y presión de un cuerpo. El proyecto a realizar tiene como fin la implementación del sentido del tacto en una prótesis o mano robótica, se diseñarán diversos sensores táctiles, con el fin de elegir el más adecuado con los parámetros de versatilidad, precisión y economía. La prioridad es de sostener objetos usados cotidianamente en el hogar, ya sea operado por una persona con amputación de miembro superior por medio de una prótesis o una inteligencia artificial por medio de un robot. El sistema se instalará en una mano robótica ya existente, de adquisición libre.

RESUMEN

Se están desarrollando diferentes sensores capacitivos, resistivos, intrínsecos y extrínsecos sensibles a la fuerza, extremadamente delgados y ligeros, con la capacidad de ser instalados en cualquier superficie, permitiendo habilitar la detección táctil y replicar el sentido del tacto en una prótesis, mano robótica o piel artificial flexible. En este trabajo se han diseñado y propuesto diferentes sensores táctiles para la implementación de un sistema sensorial en una prótesis o mano robótica, modificando y rediseñando los planos de una mano ya existente se instalaron los sensores táctiles en la yema de los dedos, además se fabricó una piel artificial sensorial en forma matricial que genera mapeos de diferentes características como detección, localización e intensidad de carga en la detección de objetos. Se presenta la selección de sensores y piezorresistivos necesarios en la elaboración de los diferentes sensores táctiles. Se muestran la adquisición, acondicionamiento y filtrado de la señal, además su respectiva caracterización. Al finalizar se realizan ensayos de detección de objetos de los sistemas sensoriales instalados en la yema de los dedos por medio de agarres de precisión y potencia, y pruebas de mapeo en la detección, intensidad de fuerza y localización de un objeto en un plano cartesiano por medio de una matriz sensorial.

Palabras Clave: Sensado, Táctil, Sensibilidad, Piezorresistivo. Detección.

ABSTRACT

Different capacitive, resistive, intrinsic and extrinsic force-sensitive sensors are being developed, extremely thin and light, with the ability to be installed on any surface, allowing to enable tactile sensing and replicate the sense of touch in a prosthesis, robotic hand or flexible artificial skin. In this work, different tactile sensors have been designed and proposed for the implementation of a sensory system in a prosthesis or robotic hand, modifying and redesigning the planes of an existing hand, tactile sensors were installed in the fingertips, in addition, a sensory artificial skin was manufactured in a matrix form that generates mappings of different characteristics such as detection, location and load intensity in the detection of objects. The selection of sensors and piezoresistive necessary in the elaboration of the different tactile sensors is presented. The acquisition, conditioning and filtering of the signal are shown, as well as its respective characterization. At the end, object detection tests of the sensory systems installed in the fingertips by means of precision and power grasp, and mapping tests in the detection, force intensity and location of an object in a Cartesian plane by means of a sensory matrix are carried out.

Keywords: Sensing, Tactile, Sensitivity, Piezoresistive.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Antecedentes del problema

Diversas manos robóticas realizan el control de la detección y manipulación de objetos por medio de señales electromiográficas, graduando el agarre por tensiones musculares, conllevando a la realización de entrenamientos complejos por parte del amputado. La implementación de sensores táctiles permite optimizar la complejidad al controlar manos robóticas por parte del operario. Diferentes empresas y universidades del mundo proponen técnicas para el desarrollo de sistemas sensoriales con materiales inteligentes de muy alto costo, provocando que sea inexecutable para una persona amputada.

1.1.2. Descripción del problema

El desarrollo y fabricación de prótesis o mano robótica son dificultoso y costosos por la gran cantidad de sistemas y dispositivos que incorpora. Los sistemas sensoriales abarcan una cantidad de materiales y diseños complejos que impiden su obtención comercialmente. La adquisición de una prótesis de mano es difícil debido a que son producidas en una limitada cantidad de países, por ende, son inaccesibles para una persona carente de una extremidad que requiera de esta tecnología para mejorar su estilo de vida.

1.1.3. Formulación del problema

¿Cómo desarrollar e implementar sensores táctiles a una mano robótica para la detección de objetos; que faciliten su fabricación y minimizando costos?

1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Las tecnologías relacionadas con el desarrollo de una prótesis biónica son inasequibles para una persona que padece de amputación de su miembro superior, debido a su alto costo y accesibilidad comercial. Se deben desarrollar técnicas que permitan minimizar costos y asequibilidad en la obtención de materiales en la elaboración de diferentes sistemas que conforman una prótesis de mano, en este caso realizar sensores táctiles de bajo costo con materiales asequibles para todo el público y fácil de manufacturar. Un sistema sensorial permite mejorar el control de una prótesis accionada por señales electromiográficas, facilitando el entrenamiento al amputado, y simplificar la fabricación y desarrollo de sistemas de detección de objetos de manos robóticas accionadas por algoritmos.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos generales

Diseñar e implementar un sistema de sensado táctil para una prótesis o mano robótica, enfocado en detección y manipulación de objetos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar un sistema mecánico para la activación de los sensores táctiles.
- Diseñar un circuito electrónico para el acondicionamiento de la señal emitidas por los sensores.
- Realizar la caracterización de los dispositivos táctiles, en la detección de objetos.
- Validar el funcionamiento de los sensores táctiles, mediante pruebas de detección y manipulación de objetos.

1.4. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

1.4.1. Alcances y limitaciones

a. Alcances

El proyecto tiene como finalidad incorporar sensores táctiles en los dedos de una mano robótica, con el objetivo de detectar objetos y sostenerlos, además diseñar una matriz señorial para la detección y localización de piezas en un plano cartesiano.

b. Limitaciones

El proyecto está establecido bajo limitaciones de diseño, conocimiento y costos. La detección de objetos esta acotado con agarres de precisión y potencia, por objetos del tamaño de una mano o inferiores.

1.5. MARCO REFERENCIAL

1.5.1. Estado del arte

En la búsqueda de la solución a la problemática planteada, se percibieron diferentes métodos y tecnologías relacionadas con el sensado táctil, desarrolladas por diversas universidades de todo el mundo, entre ellas está el departamento de tecnología de medición e ingeniería eléctrica industrial de la universidad de Lund, Suecia, se realizó un sistema para prótesis de mano con retroalimentación sensorial basada en la presión medida de la mano a la piel del antebrazo, con el objetivo de replicar el sentido del tacto a las personas amputadas de su miembro superior. El prototipo utiliza sensores de presión atmosférica, recubiertos con silicona vulcanizada a alta temperatura (HTV) en el rango de 20 a 65 shore (dureza), permitiéndole variar la presión interna del sensor al ser comprimido por las capas del material elastómero. Las señales eléctricas captadas por los sensores son transformadas en señales mecánicas (presión de aire), transmitidas por diferentes puntos del antebrazo. (1)

Los materiales piezorresistivos son muy utilizados en sistemas sensoriales, permiten determinar propiedades físicas como: presión, fuerza y en algunos casos temperatura. En un proyecto de maestría de la universidad politécnica de valencia, diseñaron galgas extensiométricas para la detección de objetos por medio de la deflexión provocado por el mecanismo de agarre, teniendo señales eléctricas representadas por la deformación del sensor en forma de ángulos. El sensor está construido con un material piezorresistivo que le permite variar su resistividad al ser sometido a una deformación. Se diseñó un sistema de agarre robótico con tecnología PneuNets, que son sistemas de actuadores suaves con accionamiento neumático, teniendo en su diseño varios canales internos que permiten el traslado del aire presurizado provocando la activación del actuador, construido con materiales elastómeros dándole propiedades mecánicas apropiadas para la activación de los sensores. (2)

Una tecnología muy popular en el prototipado de diseños es la impresión 3D, es aplicada en la elaboración de sensores táctiles para la construcción de robots blandos impresos en 4D. Esta tecnología es mencionada en un artículo de la universidad de Deakin Australia, haciendo énfasis en las técnicas de impresión en cuatro dimensiones, los tipos de sensores y actuadores utilizados en la robótica blanda: término que hace referencia al remplazo total de mecanismos sólidos, por mecanismos flexibles en toda la estructura de un robot, asemejándose más a un ser biológico. La impresión en tres dimensiones puede integrar y fabricar piel artificial para la detección de textura de materiales en los alrededores, una de las técnicas es la inserción de mallas conductoras en diferentes capas de la impresión, teniendo como base polímeros elastómeros termoplásticos. Un sensor táctil piezorresistivo se imprime utilizando un filamento compuesto de TPU y ácido poliláctico-grafeno (PLA-G). (3)

El Departamento de Ingeniería Mecánica de Energía de la universidad nacional Tsing Hua, Hsinchu, Taiwán en colaboración con varias universidades de todo el mundo, desarrollaron la arquitectura de matrices sensoriales capacitivas basados en compuestos de elastómeros y carbón multicapa, para robots suaves. Estos sensores están contruidos en diferentes capas de materiales aislantes conductores y dieléctricos, entre estos materiales están Vulcan® XC-72R y el Ecoflex, el primero siendo el relleno conductor, y el segundo la estructura protectora del sensor. El funcionamiento del sensor es basado a una arquitectura de condensadores de láminas paralelas con un aislante dieléctrico elastómero. Se reduce la distancia entre las dos capas de láminas al ser sometida a una fuerza perpendicular, variando la capacitancia en cada electrodo del sensor. (4)

En la elaboración de sensores y actuadores se emplean diversos materiales inteligentes, entre ellos están los hidrogeles, que son polímeros hidrófilos, insolubles en agua, blandos, elásticos y en presencia de agua se hinchan, aumentando su volumen, alcanzando un equilibrio físico-químico, aplicada en biomecánica. Los sensores táctiles basados en hidrogel pueden detectar el contacto físico con un objetivo de forma eléctrica, además convierte los estímulos mecánicos en formas ópticas o eléctricas. Cuando el sensor se deforma por un estímulo mecánico, el área de contacto entre el hidrogel y el dieléctrico aumenta y la distancia entre los dos hidrogeles disminuye. La tensión y la deformación se pueden medir usando el cambio de capacitancia entre los hidrogeles. Este material es muy compatible en la creación y desarrollo de sensores táctiles, por su alta capacidad de estiramiento, transparencia, conductividad y biocompatibilidad. (5)

Diferentes universidades de Francia, Canadá y Vietnam están implementando sensores capacitivos con hidrogeles flexibles, suaves y elásticos de bajo costo, garantizando detección táctil en robots, prótesis, piel y pantallas flexibles. La fabricación de estos sensores se basa en dos diferentes métodos, el primero se somete los electrodos Semi-IPN (hidrogel) a un revestimiento por rotación y después se realiza un mecanizado por láser. En la caracterización utilizan un conversor CDC (capacitancia a digital), manejando un protocolo de comunicación I2C, para el acondicionamiento de la señal y la comunicación entre sensor y microcontrolador. Su diseño tiene una forma matricial, que le permite detectar coordenadas de presión en el dispositivo, muestreada a 3 Hz. (6)

Una gran variedad de sensores táctiles aplicados en la robótica son sensores extrínsecos, son muy limitados los sistemas de agarre desarrollados con sensores intrínsecos. En un proyecto de doctorado de la universidad politécnica de valencia se diseñaron garras para la manipulación de alimentos con sensores táctiles intrínsecos, este sistema emplea acelerómetros ubicados en la parte externa de las garras del robot, permitiendo valorar la dureza de los productos que se desean manipular. El acelerómetro cumple la función de final de carrera para la detección de un objeto. El sistema monitorea el momento exacto cuando se hace contacto, determinado por variaciones de aceleración en diferentes momentos del agarre. Estos sensores se están empleando para la manipulación de piezas

extremadamente delicadas, evitando el contacto directo entre el objeto y el sensor, reduciendo el impacto causado por la deformación de un sensor de fuerza extrínseco. (7)

La escuela de ingeniería de la universidad de Tokio presento un sistema de sensado táctil intrínseco, basado en la detección de fuerza por medio de momentos de fuerza (torque), distribuidos en los dedos de una mano robótica. El sistema implementa sensores de torque instalados en cada articulación del dedo, permitiendo diferenciar fuerzas por movimiento dinámico o por obstrucción provocada por la detección de un objeto. Las diversas fuerzas generadas por el sistema son analizadas por medio de modelos matemáticos utilizando variables como torque, longitud y ángulo en los dedos. (8)

Diferentes institutos y universidades están desarrollando algoritmos complejos para la adquisición, análisis y control de sistemas sensoriales, que requieren un alto procesamiento de información. Skinware 2.0 es un software lógico de intercambio de información desarrollado por el departamento de informática, bioingeniería, robótica e ingeniería de la universidad de Génova. El programa asiste diferentes pieles desarrolladas para robots, ayudando en la adquisición de datos, control y protocolos de comunicación. El algoritmo ayuda a diferentes robots que usan procesamiento táctil, realizando tareas muy complejas como la lectura de más de 30.000 sensores procesándolos en tiempo real. El software es adaptable a las tecnologías heterogéneas enfocadas para piel robótica, incluyendo calibración, inspección de calidad y aprendizaje automático. (9)

ASS4HR es un sistema somatosensorial artificial para un humanoide desarrollado en el instituto de computación de redes de alto rendimiento de Palermo Italia. El programa se adapta a los sensores básicos con los que esta equipados, permitiendo al robot experimentar sensaciones llamadas por los autores "robocepción", permitiendo tener conciencia de su condición física, y adaptar su comportamiento. El programa proporciona información sensorial, como dolor placer, fatiga, etc. Con parámetros físicos de corriente, temperatura, carga de la batería, etc. El dolor es detectado con un umbral de aceptación establecido por el sistema, diferenciando entre un contacto leve a un contacto agresivo. La estructura que tiene ASS4HR es basado en softwares ROS (sistema operativo robótico), en este caso son paquetes de scripts de Python que implementan nodos que componen la arquitectura del programa, procesándolos y combinándolos gráficamente para su análisis, para posteriormente transmitirlos a las emociones del robot. (10)

Se está empleando inteligencia artificial en el reconocimiento de diferentes variables emitidas por un sensor táctil. El centro de investigación y el departamento de ingeniería de la universidad de Pisa Italia, implementan inteligencia artificial en sus sensores táctiles, teniendo una destreza en la adquisición de la señal de una matriz de 900 filas y 30 columnas, manejando 6 características diferentes. Aplican una red neuronal de Kohonen, caracterizada por una rutina de entrenamiento no supervisado y una capa de clasificación de 7×7 neuronas, los pesos de la red se

inicializan mediante una función aleatoria gaussiana con valores entre 0,1 y 0,9, con 1000 entrenamientos. (11)

Un método de clasificación de información táctil para la detección de personas en desastres naturales es desarrollado en un artículo de la universidad de Málaga. Implementa un sensor táctil de alta resolución, que permite obtener imágenes de mucha precisión. El sistema extrae información háptica de diferentes puntos escaneados por un brazo manipulador de 6 grados de libertad, esta información es clasificada por medio de redes neuronales, permitiendo detectar personas en ambientes con baja visibilidad con el propósito de evaluar el estado de las víctimas en función de la urgencia de atención. (12)

Existe en el mercado sensores capaces de detectar la forma y textura de un objeto. GelSight Mobile™ es un instrumento de medición que visualiza y mide con precisión la topografía 3D de cualquier superficie, revelando estructuras microscópicas del material escaneado en tiempo real. El dispositivo cuenta con un sensor elastómero inteligente capaz de adaptarse al relieve de la superficie, revelando características superficiales detalladas sin importar las condiciones de iluminación o la reflectividad de un material, por ejemplo, los metales y vidrios. Varias universidades están implementando este instrumento como un sensor táctil, acoplándolo a un mecanismo de agarre para robots, proporcionando la posición, la profundidad y otras medidas de superficie derivadas del mapeo en 3D. El instrumento les da una mayor inteligencia a los sistemas de agarres con sensores táctiles, al conocer la suavidad o dureza de un objeto permite seleccionar la mejor forma de manipular un objeto. (13)

A lo largo del marco referencial se presentaron diferentes sensores táctiles, mencionando materiales, tecnologías, algoritmos y protocolos de comunicación. Existen diferentes entidades desarrollando sensores con materiales inteligentes, que tienen propiedades resistivas y capacitivas, permitiendo variar estos patrones por contacto, fuerza, presión o cambio de temperatura. Además, se establecen dos tipos de sensores, extrínsecos e intrínsecos, el primero es diseñado para que tenga contacto directo con el objeto a detectar, y el segundo es instalados fuera del alcance de la pieza a sensar. La metodología más usada para la elaboración de sensores táctiles es por unión de capas, que componen materiales conductores, aislantes y dieléctricos. Aislantes como el Ecoflex, generando una protección y aislamiento de todos los componentes del sensor, gracias a sus propiedades elastómeras. Dieléctricos como el ácido polilactico-grafeno o hidrogel, rellenos con partículas de carbono, permitiendo variar resistividad y capacitancia por medio de deformaciones causadas por fuerzas externas. En la adquisición de datos de sensores muy complejos o de sistemas sensoriales que manejan demasiadas variables, se emplean algoritmos sofisticados para el análisis detallado de diversos sistemas, usando inteligencia artificial con redes neuronales y aprendizaje autónomo.

2. DESCRIPCIÓN DE PROTOTIPOS

En el proceso de desarrollo del proyecto se implementaron dos prototipos con materiales diferentes permitiendo realizar comparaciones entre ellos, destacando ventajas y desventajas. El primer prototipo se implementó una espuma conductiva con propiedades piezorresistivas, que al ser sometida a estrés mecánico cambian su resistividad, accionada por un mecanismo en forma de bisagra. El segundo prototipo se fabricó con base a sensores de fuerza resistivos (FSR) en la parte interna del sistema sensorial, obteniendo variación de resistividad por medio de deformaciones.

2.1. MANO ROBÓTICA

Los dos prototipos se elaboraron en base a diseños de adquisición libre (14), de una mano robótica. Se modificaron los dedos para instalar los sistemas de sensado táctil. La validación de los sensores esta aplicada en esta mano robótica ya existente, esto se realizó con el fin de ahorrar tiempo en la elaboración de un diseño desde cero y probarlo en un sistema de agarre real. En la **ilustración 1** se puede observar el diseño de la mano robótica.



Ilustración 1: Mano robótica. (14)

El movimiento de los dedos es ejercido por un sistema de tendones artificiales compuestos por una cuerda rígida y una elástica. La cuerda rígida provoca el cierre de los dedos por medio de fuerzas ejercidas por los actuadores. La cuerda elástica

permite retomar la posición inicial, es decir los dedos totalmente estirados. En la **ilustración 2** se puede observar la ubicación de los tendones y su movimiento.

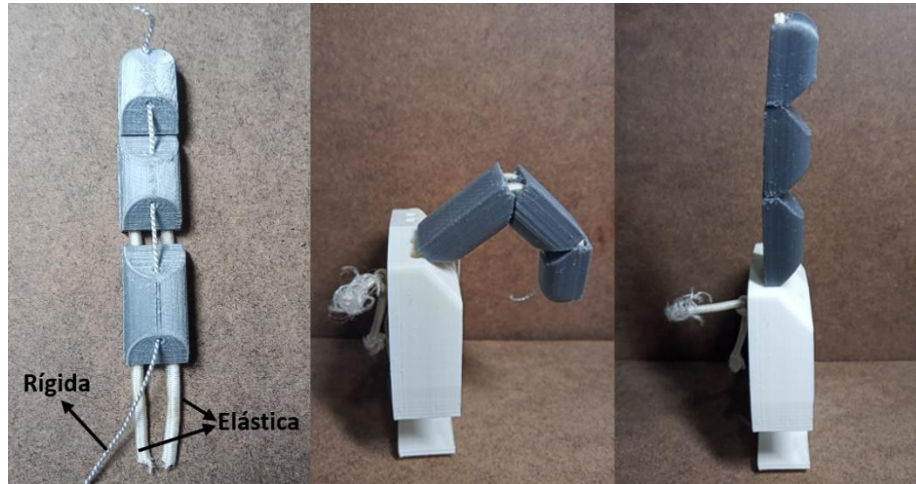


Ilustración 2: Dedo de la mano robótica.

Con base al mecanismo de movimiento y el diseño que implementa la mano robótica, se modificó la falange distal de los dedos para instalar el sistema de sensado táctil.

2.2. TIPOS DE AGARRE

Se realizó investigaciones en busca de diferentes tipos de agarre para adaptarlo al sistema de sensado táctil. Los agarres se clasifican en dos grandes tipos: agarres de potencia y de precisión. Cada uno de ellos presentan subcategorías que describen agarres con diferencias en la posición y cierre de los dedos al efectuar agarrar de objetos y en la cantidad de dedos implicados. En la **ilustración 3** se pueden observar diferentes tipos de agarre según la taxonomía de Cutkosky. (15)

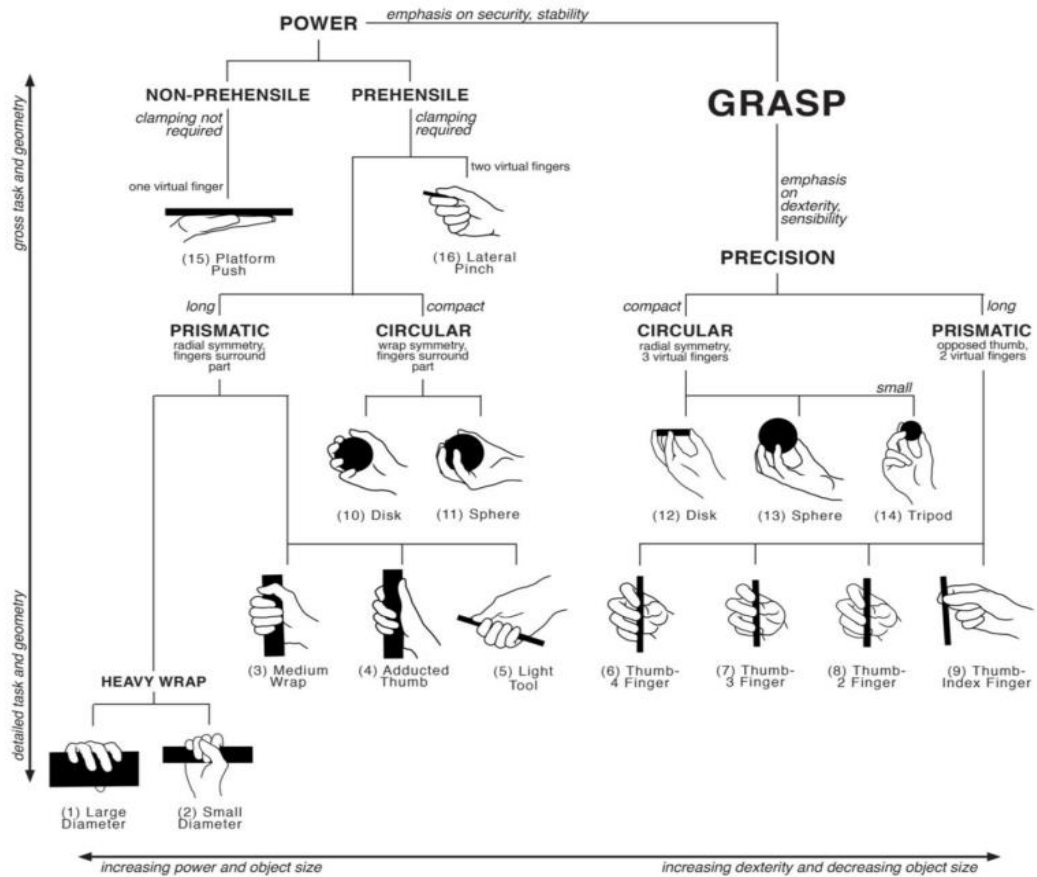


Ilustración 3: Taxonomía de agarres descrita por Cutkosky. (15)

El movimiento de la mano robótica de prueba aplica agarres de potencia y precisión mostrados en la ilustración anterior. Los agarres de potencia generan fuerzas prensiles elevadas, permitiendo afianzar objetos con mayor seguridad y estabilidad. Los agarres de precisión son generados especialmente con la yema de los dedos sin involucrar la palma de la mano, y se requiere una alta destreza y delicadeza al efectuarlos. El agarre de precisión efectuado por la mano robótica es clasificado como *Thum Index Finger* en la subcategoría de *Prismatic*, viene siendo la postura que se logra cuando el dedo índice y el dedo pulgar se juntan, para coger objetos y mantenerlos fijos cuando se necesita precisión. El agarre de potencia realizado por la mano robótica es clasificado como *Medium Wrap* en la subcategoría de *Prismatic*, se presenta cuando los dedos y el pulgar cierran de manera conjunta para crear un puño, es utilizado para mantener o sostener un objeto con geometría cilíndrica o similar. En la **ilustración 4** se puede visualizar los dos tipos de agarre.

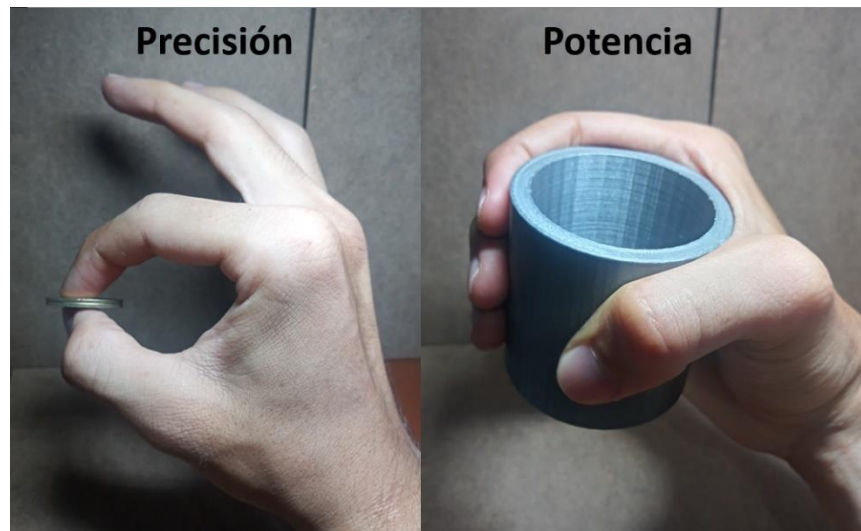


Ilustración 4: Agarres de precisión y potencia.

2.3. MATERIALES

Para la elaboración de los dos prototipos se utilizaron diferentes materiales para la estructura y piel de los sensores táctiles, además se imprimió en 3D la mano robótica.

2.3.1. Dragon Skin

Dragon Skin es una serie de materiales distribuidos por la empresa Smooth-On, especialista en la fabricación de polímeros como espumas, plásticos y gomas, que permite realizar esculturas artísticas y obras arquitectónicas de mucha calidad. Dragon Skin es una silicona líquida que se utiliza en la elaboración de moldes, crear efectos especiales de películas en el área de maquillaje. Este material tiene propiedades mecánicas similares a la piel humana, permite aplicar una piel artificial a prótesis y manos robóticas, adquiriendo elasticidad y aumento de agarre para el prensado de objetos, instalado en la yema de los dedos. En la parte de anexos del documento se presenta la ficha técnica del material (ANEXO 4).

2.3.2. PLA

La impresión 3D permite la fabricación rápida y simple de prototipos, por el método de adición por capas, aplica materiales como el PLA (ácido-poliláctico), un polímero termoplástico rígido, que permite realizar estructuras y mecanismo para un sistema de sensado táctil. La versatilidad del material a la impresión tolera una fabricación de piezas con geometría muy irregular y formas orgánicas, debido a la fundición del material, este se comporta como un material glutinoso permitiendo la adherencia perfecta entre capas de impresión. Para el desarrollo de los sensores táctiles y elaboración de moldes se utilizó PLA.

3. DESARROLLO DEL PROTOTIPO 1

En el primer prototipo se realizó sensores táctiles a base de espuma conductiva en la yema de los dedos de la mano robótica, diseñando un mecanismo de activación y deformación del material piezorresistivo, además el proceso de acondicionamiento de señal.

3.1. SELECCIÓN DE MATERIALES

La espuma conductiva antiestática permite realizar sensores sensibles a la fuerza, está fabricada de poliuretano de alta densidad impregnada de partículas de carbono brindando propiedades de resistividad eléctrica, fundamental para la implementación en un sistema táctil. La resistividad del material cambia cuando este es sometido a una deformación, esto es debido a que las partículas de carbonos se juntan permitiendo mayor flujo de electrones, es decir, su resistencia eléctrica disminuye en función a la deformación del material. Se compararon dos espumas de diferente proveedor, calificando de 1 a 5, siendo 5 la puntuación más alta y 1 la más baja sobre una característica en particular, este criterio es aplicado a todas las selecciones posteriores, en la **tabla 1** se puede observar el resultado.

Característica	038-0016-Multicomp	635.1001X
Costo	3	3
Resistencia	4	3
Adquisición	3	2
Densidad	4	3
Total	14	11

Tabla 1: Selección espuma conductiva.

Se seleccionó la espuma Multicomp por su fácil adquisición y mayor resistencia a la tracción y compresión. A mayor densidad del material, más esfuerzo se necesita al deformarlo. En la **ilustración 5** se puede visualizar la espuma conductiva. En la parte de anexos del documento se presenta la ficha técnica del material (ANEXO 4).

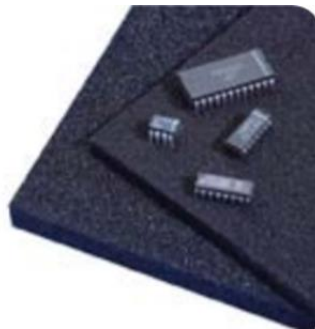


Ilustración 5: Espuma conductiva. (16)

3.2. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Para el diseño del sistema sensorial es indispensable un circuito amplificador de señal, para permitir al microcontrolador detectar señales emitidas por el sensor. Los amplificadores operacionales son circuitos integrados que permiten, comparar voltaje, amplificar señales, hacer operaciones aritméticas y filtrar señales, en este caso aumentar la tensión de salida del sensor táctil. En la **tabla 2** se puede observar la comparación de diferentes amplificadores operacionales.

Característica	LM392M	LM358M	LM324M
Costo	2	4	4
Tamaño	4	4	2
Ganancia	4	4	3
Alimentación	4	4	3
Total	14	16	12

Tabla 2: Selección de amplificadores.

Se seleccionó el amplificador LM358M por su bajo costo y tamaño, permitiendo minimizar costos y realizar circuitos con el menor espacio posibles para ser acoplado a un sistema sensorial. Al realizar las configuraciones de los amplificadores operacionales se deben usar resistencias que satisfagan los requerimientos de diseño y ganancia del circuito, en el **apartado 3.3.4** se realizara el diseño y los cálculos de ganancia para el sistema sensorial. Todos los componentes utilizados son de tecnología de montaje superficial SMD, las resistencias presentan empaques R0805 abarcando un área de 2mm de largo y 1.27mm de ancho y el amplificador un empaque 8-SOIC. En la parte de anexos del documento se presenta el datasheet del amplificador operacional (ANEXO 4).

3.3. DISEÑO DE SENSOR A BASE DE ESPUMA CONDUCTIVA

Se modificó la última falange de los dedos de la mano robótica para adaptar un mecanismo de activación para un material piezorresistivo, instalado en la yema de los dedos. Se implementó una espuma conductiva sensible a la deformación para el sistema de sensado táctil. Se diseñó un circuito de adquisición y acondicionamiento de señal.

3.3.1. Mecanismo

La espuma conductiva maneja un grosor comercial estandarizado de 6mm, puede ser deformada alcanzando hasta 1mm de espesor. Con base a las dimensiones anteriores se diseñó el mecanismo de deformación para la espuma conductiva, acoplada en los dedos de la mano robótica. El mecanismo implementado tiene forma de bisagra que permite generar una fuerza en una determinada dirección y distribuirla por medio del eje fijado de la bisagra, otorgando un movimiento circular

para la deformación de la espuma conductora. En la **ilustración 6** se puede observar el ensamblaje del mecanismo de activación del sensor.

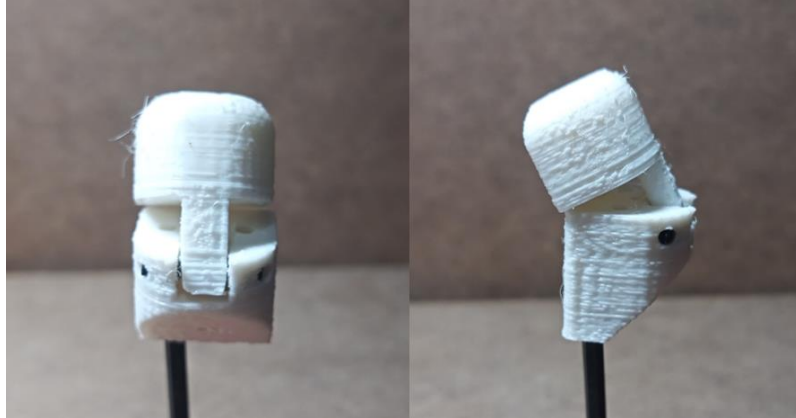


Ilustración 6: Ensamblaje mecanismo sensor de espuma conductiva.

La modificación de la falange distal de los dedos de la mano robótica tiene como resultado un mecanismo en forma de bisagra para la deformación del material sensible a la fuerza. El dedo está conformado por dos partes que al ensamblarse dejan un espacio de medio centímetro para la instalación de la espuma conductiva. En la **ilustración 7** se presenta la instalación de los tendones y el material piezorresistivo.



Ilustración 7: Instalación de tendones y espuma del sensor.

En el mecanismo de activación de la espuma conductiva se diseñaron diferentes canales dentro de la estructura del dedo. Los orificios observados en las ilustraciones anteriores son las entradas y salidas de los tendones: flexor y extensor,

además incluye las cavidades del cableado que conecta el material piezorresistivo con el circuito eléctrico.

Para obtener la resistividad de la espuma conductiva, se diseñaron canales entre la base del mecanismo y la parte trasera, incorporando el cableado detrás del área de movimiento de los dedos, observado en la **ilustración 8**. Además, se aplicó cinta de cobre adhesiva para mejorar la adquisición de la señal o resistencia de la espuma conductiva, abarcando la mayor área posible.

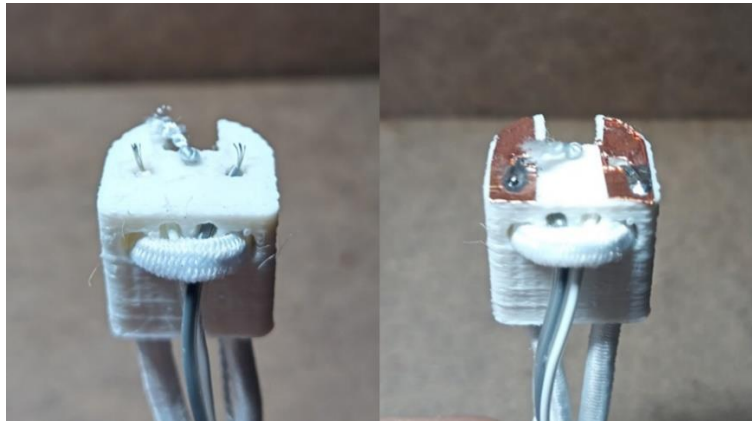


Ilustración 8: Conexiones del sensor con espuma conductiva.

El movimiento del mecanismo de deformación de la espuma conductiva se realiza ejecutando una fuerza en dirección opuesta al movimiento del cierre de los dedos de la mano robótica, conllevando a la activación de los sensores y detección de objetos. En la **ilustración 9** se puede visualizar este movimiento.



Ilustración 9: Movimiento del mecanismo del sensor.

Se realizó una piel artificial para la yema de los dedos de la mano robótica, utilizando Dragon skin (material previamente seleccionado), se diseñó moldes para el proceso de curado. En la **ilustración 10** se puede observar el molde.

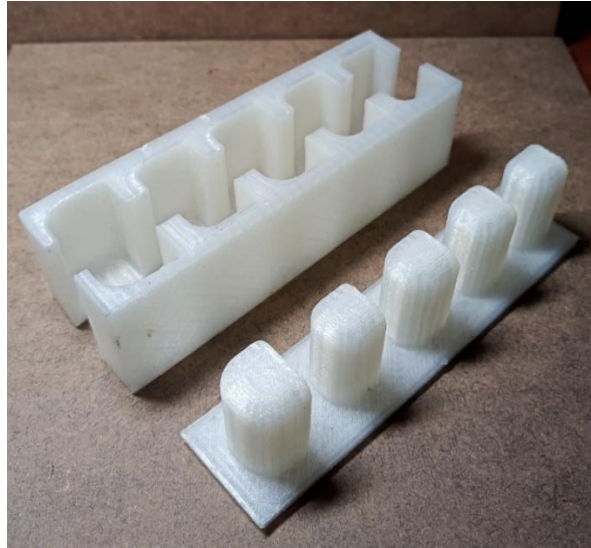


Ilustración 10: Molde impreso de la yema de los dedos del sensor.

Al aplicar la silicona líquida en el molde y luego dejar solidificar el material, se tiene como resultado yemas artificiales para cada dedo de la mano robótica. En la **ilustración 11** se puede detallar la piel artificial obtenida, y en la **ilustración 12** se puede observar su instalación en la falange de los dedos pulgar e índice.

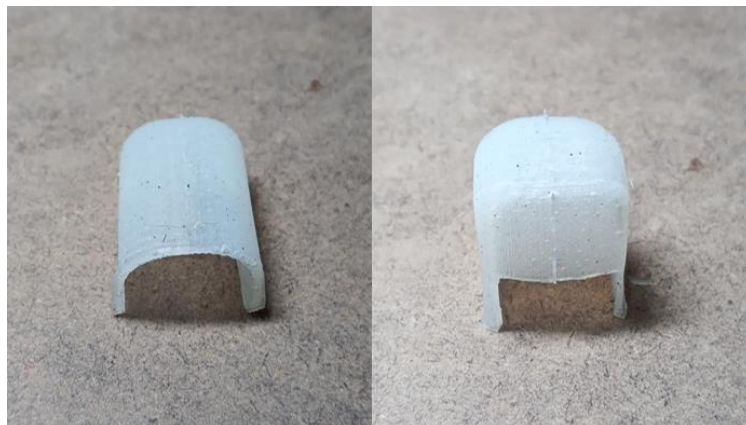


Ilustración 11: Yema de los dedos del sensor de espuma conductiva.

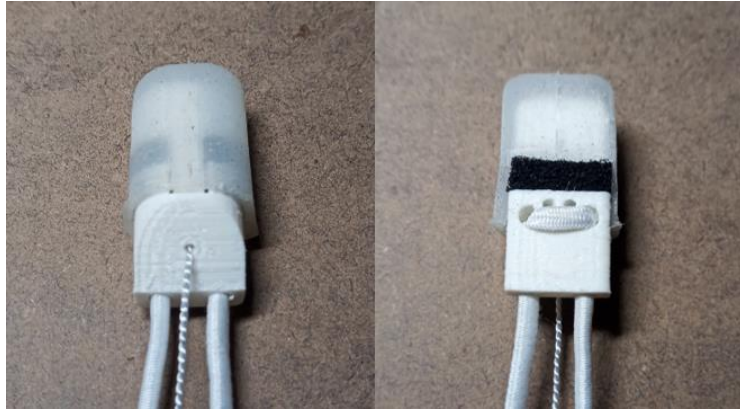


Ilustración 12: Prototipo final de sensor de espuma conductiva.

La importancia de la yema artificial instalada en el mecanismo de activación del sensor con espuma conductiva, es de obtener propiedades de adherencia en el agarre de objetos, sin esta piel el sistema de sensado táctil detectara una pieza y la dejaría caer al instante por falta de agarre entre los dedos. En la parte de anexos del documento se presentan los planos mecánicos del sensor con espuma conductiva (ANEXO 1).

3.3.2. Adquisición de datos

En la adquisición de la señal se debe analizar el comportamiento de la espuma conductiva al someterla a un voltaje determinado. Para realizar este análisis se implementó un divisor de voltaje con un arreglo de dos resistencias, R2 definida por diseño y R1 utilizando la resistividad de la espuma conductiva. El divisor de voltaje permite adquirir la señal del sensor táctil por medio de la variación de resistividad de la espuma conductiva provocada por deformaciones en el material. El circuito de adquisición de la señal se puede observar en la **ilustración 13**.

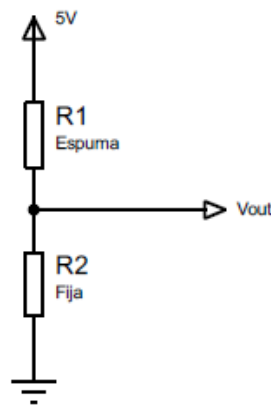


Ilustración 13: Divisor de voltaje.

A continuación, se muestra la ecuación característica del divisor de voltaje:

$$V_{R1} = \frac{V_T * R_1}{R_1 + R_2}$$

Para establecer la resistencia fija del divisor de voltaje, se realizaron pruebas de ensayo y error seleccionando resistencias con diferentes escalas para analizar el comportamiento con cada una de ellas y establecer la resistividad ideal para la adquisición de la señal del sensor. Se realizaron mediciones de tensión entre la espuma conductiva variando la resistencia fija del sistema de adquisición de datos, además se ejecutó el procedimiento con la espuma en reposo y deformada. A continuación, se puede observar los datos obtenidos con su respectiva gráfica:

Resistencia (R_2)	Voltaje resistencia (R_2)		Voltaje espuma (R_1)	
	Normal	Deformada	Normal	Deformada
10 Ω	0,2mV	1,5 mV	4,9998 V	4.9985 V
100 Ω	2,2 mV	14,5 mV	4,9978 V	4,9855 V
1k Ω	24,8 mV	134,1 mV	4,9752 V	4,8659 V
10k Ω	240 mV	945 mV	4,7600 V	4,0550 V
100k Ω	1,2 V	3,62 V	3,8000 V	1,3800 V
1M Ω	3,78 V	4,88 V	1,2200 V	0,1200 V

Tabla 3: Señal adquirida del divisor de voltaje.

En la tabla anterior se puede observar los voltajes medidos en la espuma conductiva obtenidos por un circuito de adquisición de señal, se muestran las tensiones del material cuando está en reposo o estado normal y las tensiones cuando es deformado. En la **ilustración 14** se puede observar la gráfica presentada:

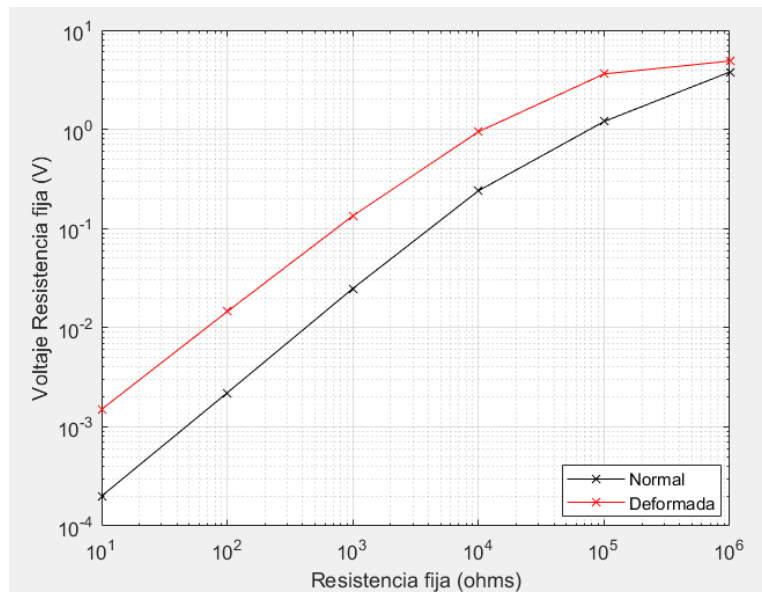


Ilustración 14: Grafica de la señal adquirida del divisor de voltaje.

En la gráfica visualizada anteriormente se puede evidenciar una tendencia en la diferencia de tensión en el sistema cuando la espuma es deformada y no deformada, a medida que la resistencia fija del divisor de voltaje aumenta, su diferencia de voltaje disminuye. Entre mayor sea la diferencia de voltaje entre los estados de la espuma mejor se comportará el sensor táctil, debido a que mayor magnitud, mejor es la cuantificación de la señal, ya que de dispondrá de mayor rango en la caracterización y resolución del sensor.

Una observación adicional con respecto a la gráfica es el acondicionamiento de la señal, con un diferencial de voltaje alto equivale a trabajar con voltajes diminutos conllevando a realizar la amplificación de la señal con una ganancia elevada, generando mayor ruido en el resultado final. Se debe seleccionar la resistencia ideal para el sistema de adquisición de datos, equilibrado en los dos parámetros mencionados anteriormente.

Al observar la **tabla 3** se deduce que la resistividad de la espuma es mucho mayor que la resistividad de la resistencia fija, ya que por ley de ohm a mayor sea la resistividad de un material mayor será la tensión en ese punto. Por ende, la adquisición de la señal se realiza en la resistencia R2 del divisor de voltaje.

Para calcular la resistividad de la espuma conductiva se realiza de forma teórica, por motivos de eficiencia en el resultado, ya que el material es inestable en su medición directa con un multímetro. La técnica utilizada es por medio de la ecuación del divisor de voltaje y con la información de la **tabla 3**. Despejamos R1 de la ecuación y obtenemos el siguiente resultado:

$$R_1 = \frac{V_T * R_2}{V_{R2}} - R_2$$

Con la ecuación anterior se calculó la resistencia de la espuma en reposo y cuando es deformada. En la **tabla 4** se puede observar los resultados obtenidos:

R2	Resistividad espuma (R1)	
	Normal	Deformada
10Ω	249,9 kΩ	33,3 kΩ
100Ω	227,1 kΩ	34,3 kΩ
1kΩ	200,6 kΩ	36,2 kΩ
10kΩ	198,3 kΩ	42,9 kΩ
100kΩ	316,6 kΩ	38,1 kΩ
1MΩ	322,7 kΩ	24,5 kΩ

Tabla 4: Resistividad de la espuma conductiva.

Realizando el cálculo de la resistividad de la espuma conductiva se halla la resistencia promedio con todos los resultados extraídos, obteniendo una resistencia aproximadamente de 250kΩ en condiciones normales, y una resistividad de 35kΩ en condiciones de estrés mecánico. Esta resistividad también depende de las dimensiones de la espuma conductiva en este caso con un volumen de $1,125cm^3$, siendo más específico un grosor de $0,5cm$ y un área de $2,25cm^2$, medidas definidas por el área transversal de los dedos de una prótesis o mano robótica promedio.

Se seleccionó una resistencia fija de 10kΩ para la adquisición de la señal por divisor de voltaje, resistencia que presenta un diferencial de voltaje amplio para la cuantificación del sensor y además presenta una escala de la tensión adecuada para el acondicionamiento de la señal. Una resistencia mayor a la seleccionada presentaría una menor cuantificación del sensor debido a su mínima diferencia de voltaje entre la espuma deformada y no deformada. Una resistencia menor originaría una ganancia mayor en el acondicionamiento de la señal y presentaría mayor ruido en el sistema. A continuación, se muestra los dos estados presentados en el circuito de acondicionamiento de la señal.

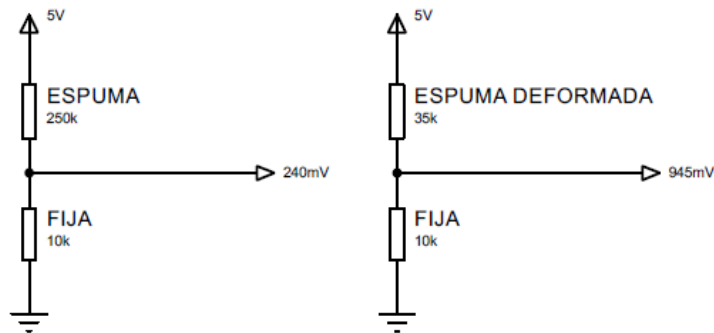


Ilustración 15: Dinámica sistema de adquisición de señal.

En la **ilustración 15** se puede observar la dinámica del sistema de adquisición de la señal. El sensor en reposo genera una tensión de salida de 240mV y al ser sometido a una fuerza en este caso la detección de un objeto, esta tensión aumentara hasta 945mV. Con base a los voltajes anteriores se procede a acondicionar la señal y posteriormente analizada por un microcontrolador.

3.3.3. Desgaste del material

La espuma conductiva tiene una resistencia a la deformación determinada, al someterla a más de 1000 esfuerzos mecánico el material se desgasta y su resistividad cambia, disminuyendo la fuerza opuesta a la ejercida por la deformación del material, además de cambiar su resistividad mecánica también cambia su resistividad eléctrica. Se realizaron mediciones de voltaje en el circuito de adquisición de señal, aplicando espumas desgastadas y comparándolas con espumas nuevas. En la siguiente tabla se puede observar los resultados obtenidos:

Resistencia (R_2)	Voltaje de salida del divisor de voltaje			
	Nuevas		Desgastadas	
	Normal	Deformada	Normal	Deformada
10Ω	0,2mV	1,5 mV	0,0 mV	0,4 mV
100Ω	2,2 mV	14,5 mV	0,0 mV	5,5 mV
1kΩ	24,8 mV	134,1 mV	0,5 mV	67,5 mV
10kΩ	240 mV	945 mV	5,0 mV	580 mV
100kΩ	1,2 V	3,62 V	100 mV	2,2 V
1MΩ	3,78 V	4,88 V	400 mV	4,1 V

Tabla 5: Variación del voltaje por desgaste del material.

En la tabla anterior se puede observar que la espuma conductiva pierde resistividad con el uso, además presenta pérdidas en la sensibilidad ya que las tensiones han disminuido. A continuación, se muestra la gráfica comparativa entre la espuma nueva y desgastada:

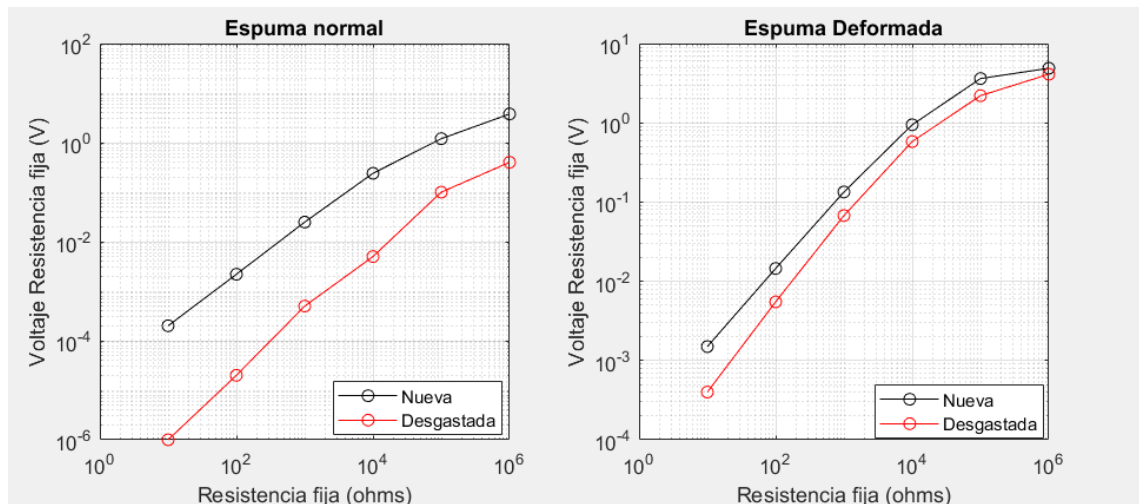


Ilustración 16: Gráfica variación de la señal por desgaste del material.

La primera grafica de la **ilustración 16** presenta las mediciones del material en reposo sin ejercer ninguna fuerza sobre él. La curva negra representa el material nuevo y la curva roja el material desgastado, evidenciando una gran diferencia en el voltaje de la señal. En la segunda grafica se muestra las mediciones de voltaje del divisor de voltaje con las espuma nueva y desgastada, sometidas a una presión o deformación, evidenciando un leve cambio en la señal del sistema. El sensor en reposo cambia su tensión en el trascurso del desgaste del material, pero al ser sometidas a una fuerza se evidencia que esta diferencia disminuye. Con base a la información recopilada anteriormente se realiza el acondicionamiento de la señal cuando la espuma este nueva o desgastada.

El comportamiento físico observado entre la transición del material nuevo a llegar a su total desgaste es de aumentar su grosor un milímetro más, aumentando la separación de las partículas de carbono que conforman el material, por ende, el material se vuelve más resistivo eléctricamente, pero su contextura física cambia, provocando menor fuerza de oposición en la presión y deformación del material.

Se realizaron ensayos de resistividad de la espuma en función del número de deformaciones provocadas al material piezorresistivo ejercida por el mecanismo de bisagra diseñado. A continuación, se presenta la variación de la resistividad del material al ser sometido a una acumulación de estrés mecánico:

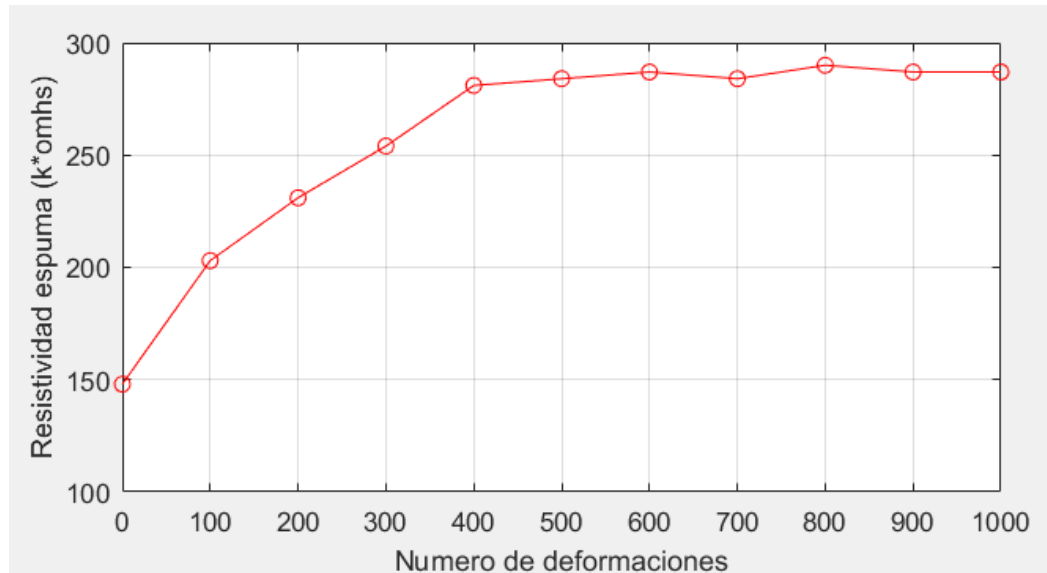


Ilustración 17: Grafica resistividad del material en función de deformaciones.

En la **ilustración 17** se observa que la resistividad de la espuma conductiva nueva inicia aproximadamente en $148\text{k}\Omega$, con la acumulación de estrés mecánico en el material, esta resistividad cambia hasta estabilizarse después de las 500 deformaciones, llegando a una resistividad de $290\text{k}\Omega$. Todos los valores medidos y calculados se realizaron con la espuma deformada.

3.3.4. Acondicionamiento de señal

La fase de acondicionamiento permite adaptar la señal del sensor al convertor ADC (análogo digital) del microcontrolador, por medio de amplificadores operacionales ajustamos la señal a un rango en especial, en este caso de 0 a 5V, rango manejado por la mayoría de microcontroladores. La etapa de amplificación se realiza por la baja tensión que se recibe en el circuito de adquisición de la señal imposibilitando la detección de la tensión al convertor ADC.

Se seleccionó el amplificador operacional no inversor debido a que se requiere hacer una amplificación sencilla de voltaje positivo en la señal resultante del divisor de voltaje y de ahorrar espacio en la placa electrónica, ya que uno de los componentes más voluminosos que conforma una prótesis de manos comercial son las baterías, al adaptar un amplificador inversor es necesario alimentar el integrado con una fuente dual esto implica instalar doble batería para cumplir esta necesidad, además hay baterías que cumplen con esta función dual, pero son mucho más costosas. El amplificador operacional con configuración no inversor

cumple con los requerimientos necesario para el acondicionamiento de la señal de los sensores táctiles.

Con la información recopilada de la **tabla 5** se realiza el diseño del circuito de acondicionamiento de la señal. Se ha planteado utilizar una resistencia fija en el divisor de voltaje de $10k\Omega$ con la espuma totalmente desgastada, los voltajes presentados con la configuración mencionada, presentan una tensión de $5mV$ en estado de reposo (el sensor sin carga mecánica) y $580mV$ en estado de deformación (el sensor con carga mecánica). Con base al voltaje de accionamiento del sensor se procede a calcular la ganancia necesaria para amplificar y atenuar la señal. En la **ilustración 18** se puede evidenciar la configuración de un amplificador no inversor.

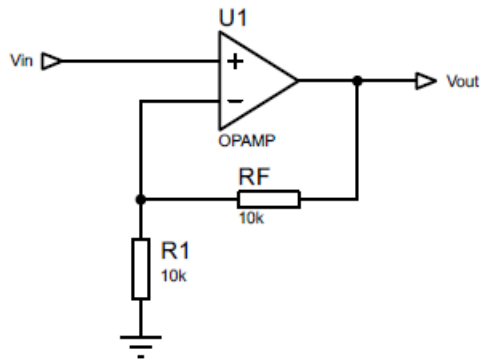


Ilustración 18: Amplificador no inversor.

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_i$$

$V_o =$ voltaje de salida

$V_i =$ voltaje de entrada

$$\left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) = \text{ganancia (A)}$$

$$V_o = A V_i$$

$$A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{5V}{580mV} = 8,62$$

Al calcular la ganancia necesaria para amplificar y atenuar la señal se obtiene un valor de 8.62, ganancia que se sobredimensiona a 10 por motivos de confiabilidad en la detección de objetos por el sensor táctil. Al ampliar la ganancia calculada se evita que el amplificador no atenúe bien la señal, por deterioro en la espuma conductiva, igualmente se aumenta la sensibilidad del sensor, necesaria en la detección de objetos. En la activación de los sensores no es necesario deformar completamente la espuma conductiva (cerrar al mecanismo de bisagra al máximo), ya que en condiciones reales en el prensado de objetos pequeños no se requiere mucho torque para detectar una pieza, por eso se aumenta el rango de atenuación.

Al definir la ganancia del sistema de acondicionamiento de la señal se procede a calcular las resistencias de la configuración del amplificador no inversor:

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

Se define una resistencia de $10k\Omega$ en R_f

$$R_1 = \frac{R_f}{A - 1} = \frac{10k\Omega}{10 - 1} = 1111.11\Omega$$

Al definir la resistencia R_f se obtuvo una resistividad de 1111.11Ω en R_1 , valor de resistencia no comercial, por ende, se aproxima un valor comercial cercano, estableciendo una resistencia de $1k\Omega$, siempre ajustando las variables a las condiciones reales en el mercado. Con las dos resistencias definidas se ajustó la ganancia con un valor final de 11.

Ganancia	Atenuación	
	Normal	Deformado
8	40mV	4,64V
9	45mV	5,22V
10	50mV	5,80V
11	55mV	6,38V
12	60mV	6,96V
13	65mV	7,54V
14	70mV	8,12V

Tabla 6: Diferentes atenuaciones con respecto a la ganancia.

En la **tabla 6** se puede observar que la ganancia que se acerca más a la atenuación ideal esta entre 8 y 9, exactamente 8,62 calculado anteriormente, pero se sobredimensiono el valor para aumentar sensibilidad en el sensor. El conversor ADC del microcontrolador soporta una tensión máxima de 5V al superar este voltaje puede provocar daños en el equipo, se recomienda alimentar el sensor entre 5 a 6V.

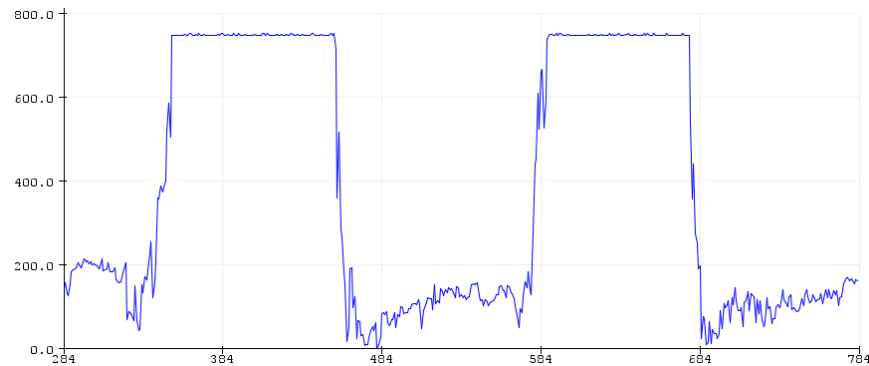


Ilustración 19: Señal amplificada.

El microcontrolador tiene un conversor análogo digital de 10 bits es decir tiene un rango entre 0 a 1023, con una resolución cuantificada de $4,88mV$. En la **ilustración 19** se puede visualizar la señal resultante, graficada de resolución en función de la cantidad de muestras recolectadas, se puede evidenciar dos pulsos en la gráfica, representando dos detecciones de objetos en el paso del tiempo, además se observa ruido en la señal resultante, que será debidamente filtrada, etapa propuesta más adelante.

3.3.5. Filtro

En el suavizado y estabilización de la señal del sensor táctil se debe instalar una etapa de filtrado para mejorar el acondicionamiento de la señal. Se instaló un filtro pasa bajo pasivo después de la etapa de amplificación, ajustando la atenuación de la señal resultante. El filtro pasa bajo permite eliminar y descartar todo el ruido en frecuencias altas del sensor táctil, ruido que se presenta en la amplificación de la señal observado en la **ilustración 19**. Los componentes pasivos son materiales fáciles de adquirir y su configuración facilita la disminución del tamaño en la placa electrónica.

Para localizar la frecuencia de corte del filtro se eligieron diferentes valores para localizar la frecuencia ideal, graficando sus respectivos resultados. En la **ilustración 20** se puede observar lo planteado.

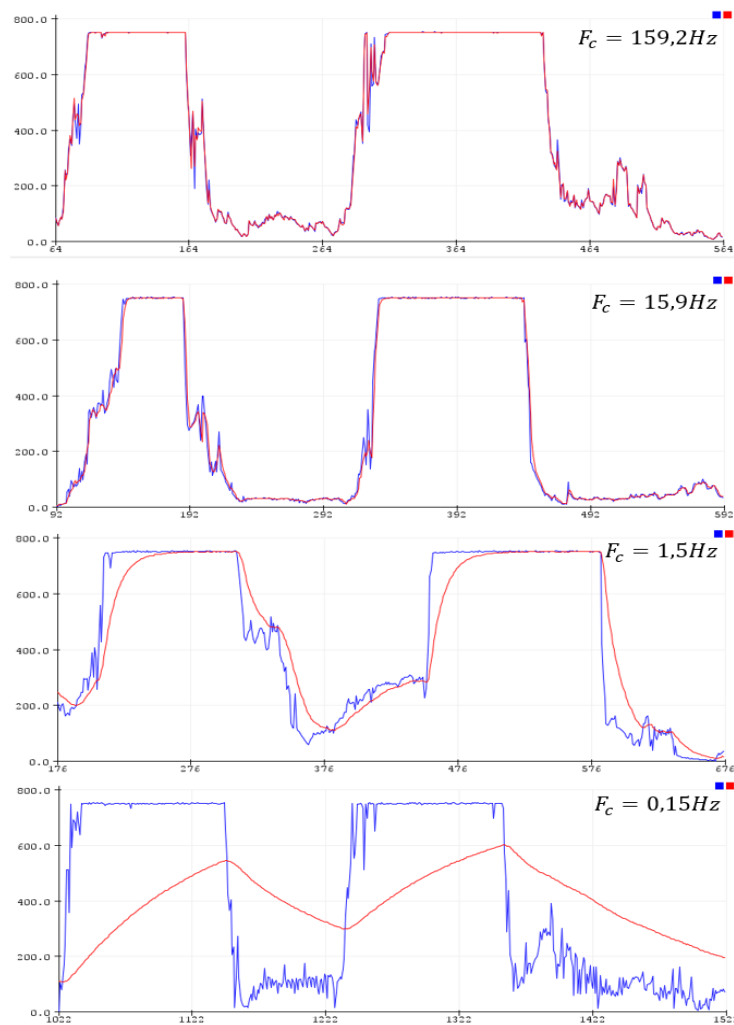


Ilustración 20: Filtro pasa bajo con diferentes frecuencias de corte.

En la ilustración anterior se puede visualizar la señal de entrada y de salida del filtro. La gráfica observada de color azul es la señal adquirida por el divisor de voltaje y posteriormente amplificada por los amplificadores operacionales. La grafica representada de color rojo es el comportamiento de la señal filtrada con diferentes frecuencias de corte.

Se realizaron las respectivas validaciones con respecto a las gráficas mostradas anteriormente, y se observar en la frecuencia de corte de 1,5Hz cumple con los requerimientos. Al obtener el valor esperado se procede a calcular la resistividad y capacitancia de los componentes pasivos que conforman el filtro.

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Se define un capacitor de $10\mu\text{F}$

$$R = \frac{1}{2\pi C F_c} = \frac{1}{2\pi(10\mu\text{F})1,5\text{Hz}} = 10\text{k}\Omega$$

En la **ilustración 21** se puede evidenciar la configuración establecida para el filtro pasa bajo y en la **ilustración 22** se visualiza la señal filtrada.

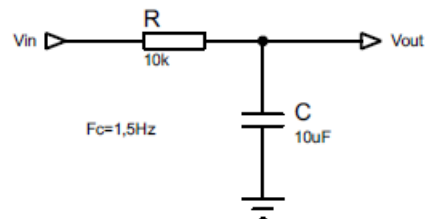


Ilustración 21: Configuración filtro pasa bajo.

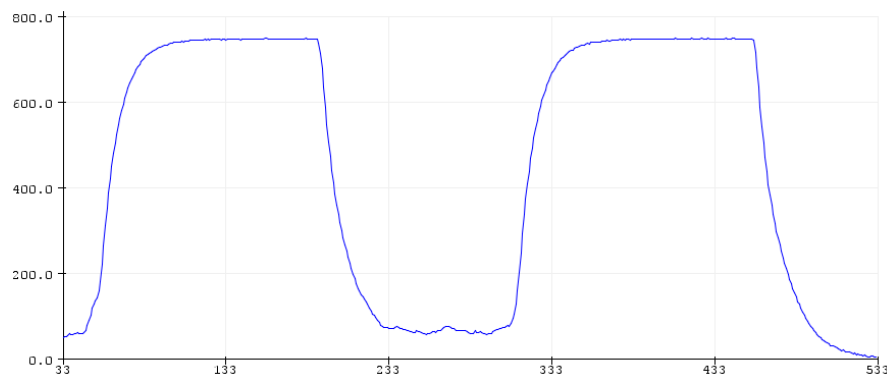


Ilustración 22: Señal filtrada.

Con se puede observar en la ilustración anterior, se evidencia la señal suavizada por el filtro, eliminando el ruido provocado por la espuma conductiva, manifestada por encima de $1,5\text{Hz}$.

3.3.6. Histéresis

En el proceso de caracterización del sensor con espuma conductiva se analizó el comportamiento del voltaje en función de la masa, detectando histéresis en la señal resultante. A continuación, se puede observar los valores obtenidos:

Masa (g)	Voltaje (V_{out})	
	Carga	Descarga
0g	0.01V	0.04V
20g	0.42V	1.26V
40g	1.22V	2.01V
60g	2.12V	2.78V
80g	3.01V	3.38V
100g	3.65V	3.65V

Tabla 7: Voltajes en carga y descarga.

La histéresis es la diferencia máxima que tienen la lectura de un valor medido, cuando la variable real se encuentra en proceso de cambio, en aumento o disminución de su valor, en este caso la carga medida por el sensor presenta dos lecturas diferentes cuando el sensor está en proceso de carga y cuando está en el proceso de descarga. En la **ilustración 23** se puede visualizar este fenómeno.

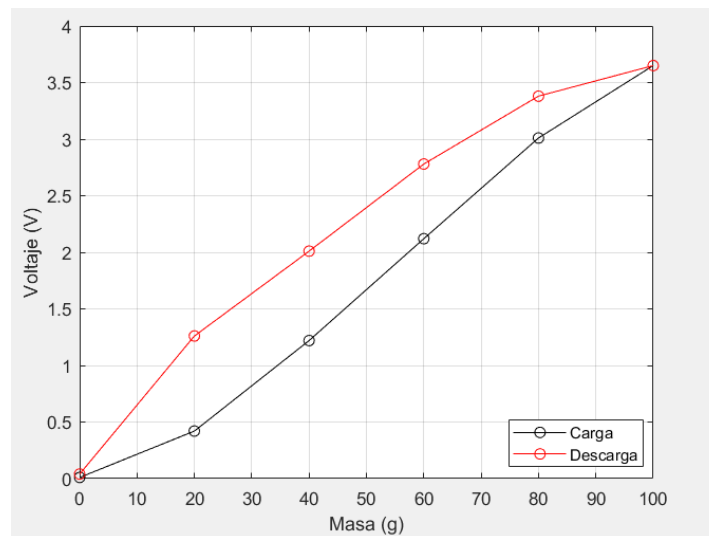


Ilustración 23: Histéresis sensor de espuma conductiva.

En ilustración anterior se puede detallar el comportamiento del voltaje en la carga y descarga del sensor táctil. En la descarga del sensor se puede observar que aumenta el voltaje en comparación de la carga presentado en el mismo punto.

Al realizar los ensayos de fuerza en el sensor táctil de espuma conductiva, se detectó inestabilidad en el material, debido a los resultados de voltaje obtenidos. Se manifiesta diferentes valores y rangos de voltaje en el proceso de caracterización del sensor, en cada prueba se obtienen valores diferentes. El material presenta cambios eléctricos con el paso del tiempo por desgaste de la espuma, además presentando histéresis en su señal. Todos estos factores han determinado un material inconstante en el proceso de caracterización, por ende, se definirá la señal del sensor digitalmente, manifestando dos estados HIGH o LOW, representada como una salida booleana, 0 o 1 lógico. Las tensiones que determinan el alto o bajo del sensor táctil es definido en el algoritmo de detección de objetos de una mano o prótesis robótica, por medio de pruebas de agarres de piezas se halla el voltaje de transición entre los dos estados.

3.3.7. Calibración del sensor

Una mano robótica debe tener la capacidad de flexionar las falanges hasta que se haya detectado un objeto, en este caso los actuadores dejan de moverse manteniendo los ángulos necesarios para sostener la pieza, evitando torques excesivos. Si el sensor táctil no tiene la capacidad de detecta objetos, los actuadores seguirán ejerciendo fuerza hasta que el sensor se active, provocando daños en la estructura de la mano robótica o deformaciones en los objetos a suspender en el caso de que sean frágiles. Para aumentar la confiabilidad del sensor táctil se debe realizar un debido proceso de calibración, por medio de ensayos de fuerza y prensado de objetos en una prótesis, determinar la configuración adecuada en el circuito de acondicionamiento de la señal. La calibración del sensor se realiza variando la ganancia del amplificador operacional, hasta hallar un valor ideal. Se instaló un potenciómetro con tecnología de montaje superficial en una de las resistencias de la etapa de amplificación, con la finalidad de mejorar la experiencia de calibración del sensor por parte del usuario, evitando soldar y desoldar resistencias. La selección del potenciómetro se realizó con base a los valores definidos y cálculos realizados en la amplificación de la señal. En la **ilustración 24** se muestra el circuito eléctrico del sensor táctil con espuma conductiva con sus respectivas etapas:

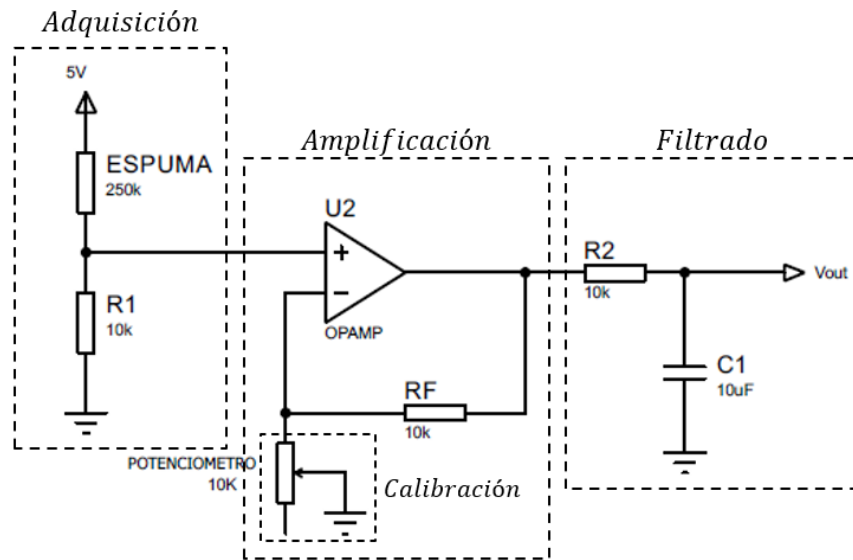


Ilustración 24: Etapas acondicionamiento de la señal.

Por medio de la calibración del sensor también se aumenta su sensibilidad al detectar objetos. A medida que aumenta la ganancia del amplificador su sensibilidad aumentara. La calibración de la sensibilidad del sensor debe estar equilibrada en los estados de HIGH y LOW de la señal, evitando que el sistema táctil no detecte objetos o en el caso contrario que detecte objetos erróneamente, por sensibilización del dispositivo.

Las entradas digitales del microcontrolador determinan un “1” lógico al sobrepasar una tensión de más de 3V, con base a este valor se determina el voltaje de aceptación en la detección de objetos por parte del sensor táctil. En la **tabla 8** se puede evidenciar la variación de la ganancia o sensibilidad del sistema en la detección de diferentes cargas. Una ganancia de 25 detecta cargas mayores de 20g y una ganancia de 2,7 detecta cargas mayores de 100g.

Ganancia Sensibilidad	Detección Masa	Detección Fuerza
2,7	M>100g	F>0,98N
3,3	M>80g	F>0,78N
4,7	M>60g	F>0,58N
8,4	M>40g	F>0,39N
25	M>20g	F>0,19N

Tabla 8: Detección de cargas con respecto a la sensibilidad.

Al realizar los ensayos de fuerza en el sensor táctil de espuma conductiva se halló la carga máxima detectada por el sistema. Esta carga es aproximadamente de 100g o 0,98N, limitado por la fuerza ejercida por la oposición de la deformación del material, además del mecanismo de activación en forma de bisagra.

3.3.8. Diseño PCB

El diseño de la placa electrónica del sensor táctil con espuma conductiva se realizó con el parámetro de tamaño, abarcar la menor área posible en el diseño, para facilitar la instalación en el sensor en una estructura interna de una mano o prótesis robótica. La placa mostrada en la **ilustración 25** presenta un circuito de adquisición, acondicionamiento y filtrado de la señal alimentado a 5v.

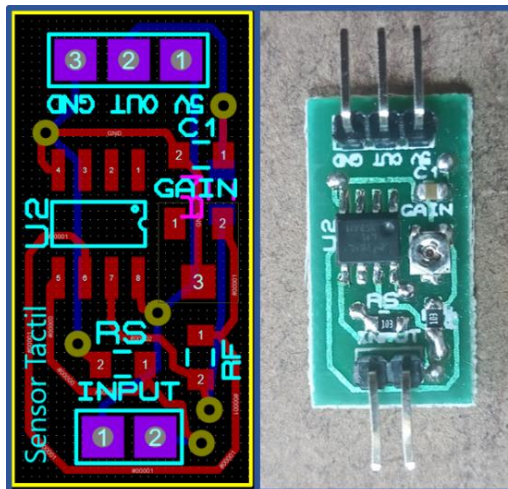


Ilustración 25: Placa electrónica sensor con espuma conductiva.

La PCB del sensor táctil con espuma conductiva presenta 5 pines en su arquitectura, dos pines son conectados al material piezorresistivo y los tres últimos son la alimentación del circuito más la señal análoga resultante. Las dimensiones abarcadas son de 25mm de largo y 13mm de ancho. En la **ilustración 26** se puede evidenciar la proporción de tamaños comparada con una mano y una moneda.

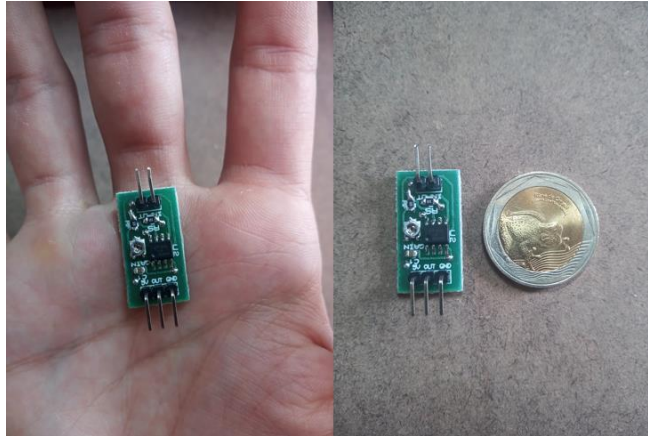


Ilustración 26: Proporción PCB sensor táctil.

Las dimensiones de la placa electrónica son ideales en la instalación del circuito eléctrico en las falanges de los dedos de una mano robótica ahorrando espacio en otros componentes electrónicos más voluminosos como los actuadores de una prótesis. En la parte de anexos del documento se presentan los planos eléctricos del sensor con espuma conductiva (ANEXO 2).

4. DESARROLLO DEL PROTOTIPO 2

En el segundo prototipo se instalaron sensores de fuerza resistivos (FSR) en la yema de los dedos de la mano robótica, para permitir detectar y agarrar piezas. Antes de incorporarlo se diseñó una capa de activación y protección para aumentar la precisión en la detección de objetos, moldeándolo en forma y tamaño de un dedo promedio. Por limitaciones de costos se instalaron en los dedos índice y pulgar, realizando validaciones únicamente con agarres de precisión.

4.1. SELECCIÓN DE SENSORES

Se han seleccionado diferentes sensores comerciales para acoplarlo en un sistema de sensorial en la yema de los dedos de una mano robótica. Uno de los dispositivos más populares en el mercado para medir fuerzas son los sensores de fuerza resistivos FSR, teniendo una característica muy particular de convertir la presión, tensión o fuerza en un cambio de la resistencia eléctrica, que permite ser medido. En la **ilustración 27** se presenta tres sensores de diferentes modelos y en la **tabla 9** se puede observar las comparaciones con sus valores totales.

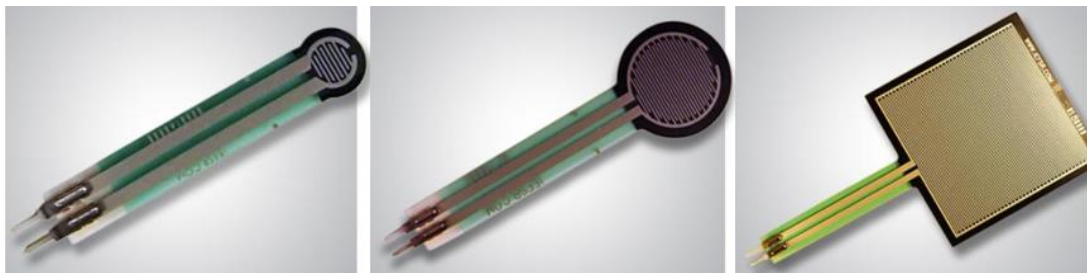


Ilustración 27: Sensores de fuerza resistivos serie FSR400 (17).

Característica	FSR400	FSR402	FSR406
Costo	4	4	3
Tamaño	4	4	2
Accesibilidad	4	4	3
Precisión	2	4	5
Instalación	3	5	2
Total	17	21	15

Tabla 9: Selección sensor de fuerza resistivo.

En la tabla anterior se puede evidenciar la comparación de los diferentes modelos de sensores de fuerza resistivos. El modelo FSR402 presenta la mayor puntuación con respecto a los demás modelos, su precisión e instalación es la más adecuada debido al área de activación del sensor, que es similar al tamaño de los dedos de una mano promedio, adaptándose perfectamente en la detección de objetos. En la

parte de anexos del documento se presenta la ficha técnica de los sensores de fuerza resistivos (ANEXO 4).

4.2. SELECCIÓN DE MICROCONTROLADORES

Para el sistema de sensado táctil es necesario utilizar microcontroladores para la adquisición y procesamiento de la información de la señal resultante. Se eligieron microcontroladores que se puedan instalar en un circuito PCB y ocupe el menor espacio posible, que permita analizar los datos emitidos por los sensores, teniendo conectividad entre sensor y computador, además pueda ser instalado en un sistema de sensado táctil. Se compararon tres microcontroladores diferentes para la selección de los dispositivos electrónicos en la **tabla 10** se puede observar los resultados.

Característica	Arduino Nano	A-Star 32U4 Micro	ATmega168-PA
Costo	4	3	4
Tamaño	2	4	5
Versatilidad	4	4	2
Comunicación	4	4	2
Total	14	15	13

Tabla 10: Selección de microcontroladores.

En la tabla anterior se evidencia al A-Star 32U4 con mayor puntuación debido a su tamaño y versatilidad en la implementación en un sistema de sensado táctil. El Pololu A-Star 32U4 Micro es un módulo programable de uso general basado en el microcontrolador ATmega32U4 AVR, incluye un conector USB Micro-B, un encabezado de programación en el sistema (ISP), compatible con Arduino. Este microcontrolador es ideal para la observación de información adquirida por el sensor desde un sistema operativo. Si se requiere instalarlo directamente en una prótesis o mano robótica, este microcontrolador se adapta al tamaño requerido. En la **ilustración 28** se puede evidenciar el dispositivo.

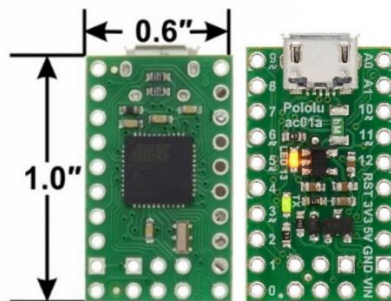


Ilustración 28: Pololu A-Star 32U4 Micro. (18)

4.3. DISEÑO DE SENSOR DE FUERZA RESISTIVO

Se han modificado los dedos de la mano robótica para adaptar sensores FSR en la yema de los dedos, usan diferentes materiales en la estructura y superficie del sensor, además se diseñó un circuito de adquisición de señales. Se ha adaptado para realizar agarres de precisión, entre el dedo índice y pulgar.

4.3.1. Estructura

Para instalar el sensor FSR en el dedo de la mano robótica, se diseñó una estructura de guía y soporte para el sensor, teniendo presente los orificios que cruzan los tendones de los dedos, en la falange distal. En la **ilustración 29** se visualiza la estructura de los dedos índice y pulgar, a la izquierda se presentan el diseño y a la derecha el físico.

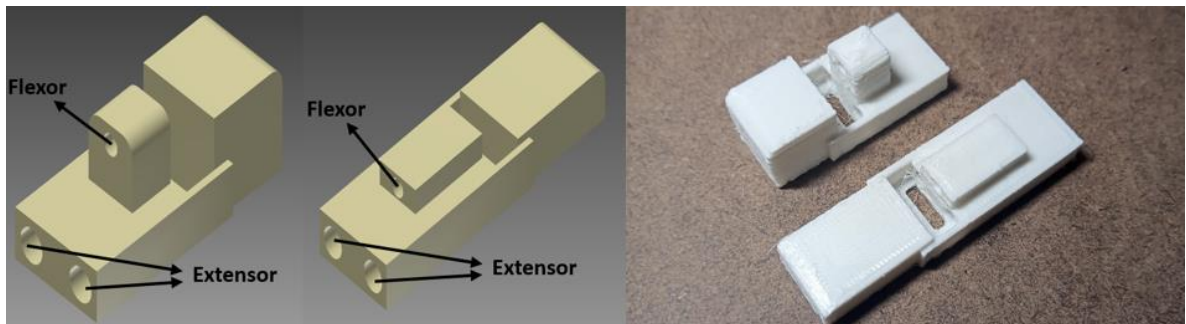


Ilustración 29: Estructura en 3D del sensor de fuerza resistivo.

En la parte superior de la estructura, se puede observar la abertura del tendón flexor, y en la parte inferior se muestra las aberturas del tendón extensor. El área de contacto de activación del sensor FSR es ubicada en la parte superior de la estructura. La parte restante del sensor es atravesada totalmente hasta llegar a la parte posterior de la estructura, ubicando los pines de conexión del sensor en la parte trasera, aislando el cableado del área de movimiento de los dedos. En la **ilustración 30** se presenta el acoplamiento entre estructura y sensor.

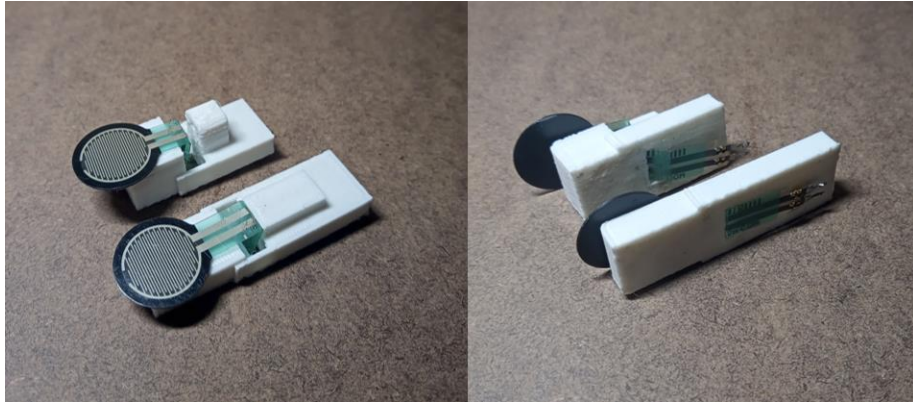


Ilustración 30: Acoplamiento de estructura con sensor de fuerza resistivo.

4.3.2. Superficie

El sensor necesita un material superficial de contacto para la activación de las celdas del sensor FSR, además tener propiedades de adherencia para el agarre de objetos. El acabado del sensor se realiza con el recubrimiento de Dragon Skin de toda la superficie de la estructura de la falange distal del dedo modificado. En la aplicación del Dragon Skin, se debe diseñar un molde con la silueta del dedo de la mano robótica, con el propósito de cubrir toda la estructura de la falange con el FSR. El molde permite darle forma a todo el sensor, mientras que la silicona líquida se solidifica. En la **ilustración 31** se puede observar el molde.

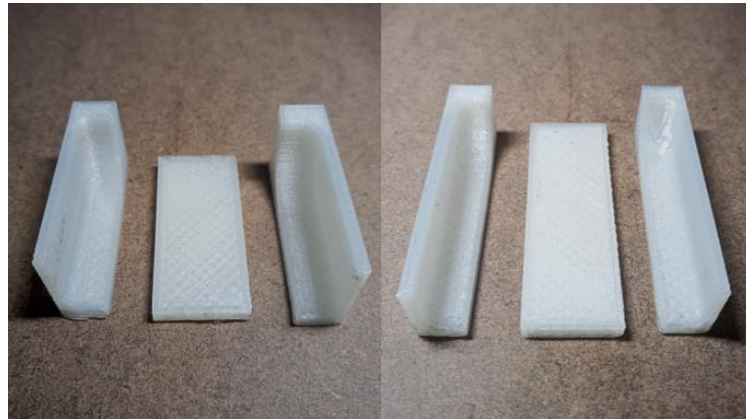


Ilustración 31: Molde impreso en 3D del sensor de fuerza resistivo.

Antes de aplicar el material superficial del sensor, se debe instalar los tendones de los dedos de la mano robótica y reducir el área de contacto de la celda del sensor, para igualar el diámetro de la estructura. En la **ilustración 32** se puede observar los tendones en la estructura del sensor de fuerza resistivo.

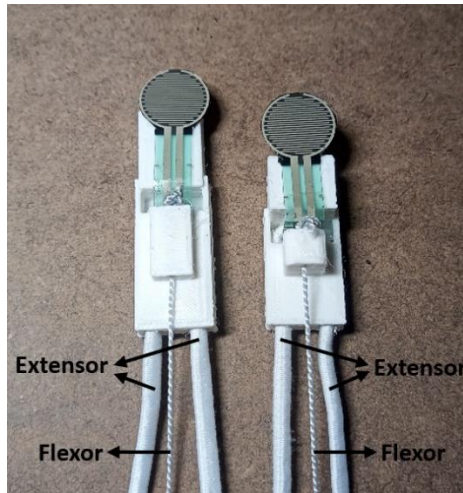


Ilustración 32: Instalación de los tendones en la estructura del dedo.

La aplicación del Dragon Skin es por medio de un proceso de curado, se mezcla la parte A y la parte B del material, una vez se fusionan estas dos partes el material se endurece en 40 minutos aproximadamente. El molde está dividido en tres partes, este diseño tiene el propósito de facilitar la separación del molde con el material solidificado, evitando daños entre la superficie moldeada del sensor. En la **ilustración 33** se puede observar el ensamblado del molde y la instalación de la estructura dentro del molde.

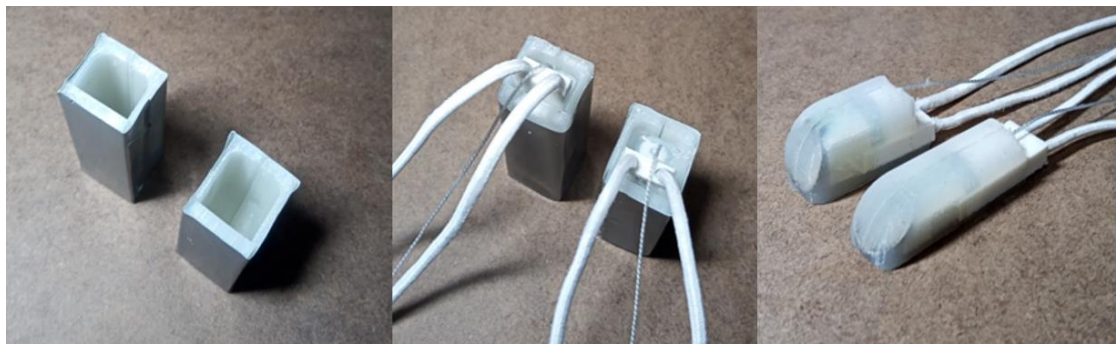


Ilustración 33: Proceso de curado del sensor de fuerza resistivo.

En la **ilustración 33** se observa la falange distal de los dedos índice y pulgar de la mano robótica después del proceso de curado con Dragon Skin. El molde permite ubicar las celdas del sensor FSR en la yema de los dedos, una localización estratégica para la detección de objetos. La capa protectora del dedo permite aislar el sensor de fuerza resistivo con el ambiente exterior. El material superficial amortigua los impactos provocados en la presión de piezas. La elasticidad del

material permite la distribución de fuerzas entre la superficie del dedo con el área de contacto del sensor FSR, generando mayor precisión en el sensado táctil. En la parte de anexos del documento se presentan los planos mecánicos del sensor de fuerza resistivo (ANEXO 1).

4.3.3. Circuito eléctrico

Se diseñó un circuito eléctrico que adquiriera y analizara la señal emitida por el sensor táctil. Está conformado por una zona de adquisición de datos, conectando sensor con microcontrolador. El circuito tiene conexiones para el control de actuadores, con el propósito tener sincronizado el sistema de agarre con el sistema de sensado táctil, permitiendo detener el movimiento de los dedos cuando se detecte un objeto. Se integró el microcontrolador Pololu A-Star 32U4 Micro, con la finalidad de analizar los datos en un sistema operativo, usando su puerto micro USB.

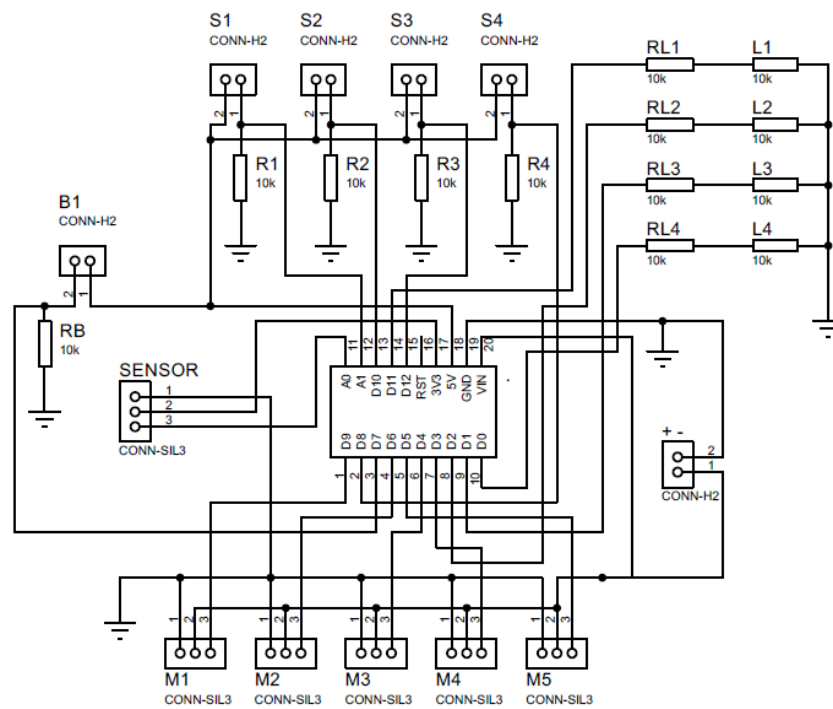


Ilustración 34: Esquema eléctrico del sensor de fuerza resistivo.

En la **ilustración 34** se observa el circuito eléctrico. Está conformado por diferentes puertos: S1, S2, S3 y S4 son las conexiones entre los sensores táctiles incorporados en los dedos de la mano con el microcontrolador. M1, M2, M3, M4 y M5 son los pines de control de los servomotores de la mano robótica. L1, L2, L3 y L4 son leds

que permiten señalar un determinado voltaje emitido por la detección de un objeto sin necesidad de una interfaz gráfica. La conexión B1 permite instalar un pulsador para variar el tipo de agarre y el movimiento de los dedos, sin necesidad de reprogramar el microcontrolador. Los puertos SENSOR permiten instalar un sensor muscular o un pulsador para activar los diferentes tipos de agarre sin necesidad de una interfaz gráfica. En el diseño de la PCB para cada circuito electrónico se implementaron componentes de tecnología superficial para disminuir el tamaño de la placa. La PCB de la **ilustración 35** tienen un tamaño de 35mm de alto y 40mm de ancho.

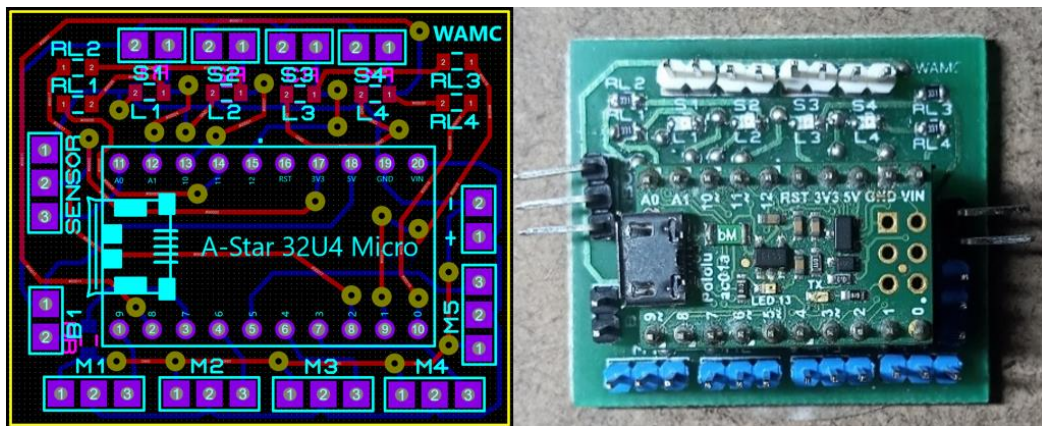


Ilustración 35: PCB del sensor de fuerza resistivo.

En la **ilustración 36** se puede observar las conexiones de la placa electrónica con la mano robótica, presentando la unión del sensor táctil del dedo índice con la PCB y su respectivo actuador.

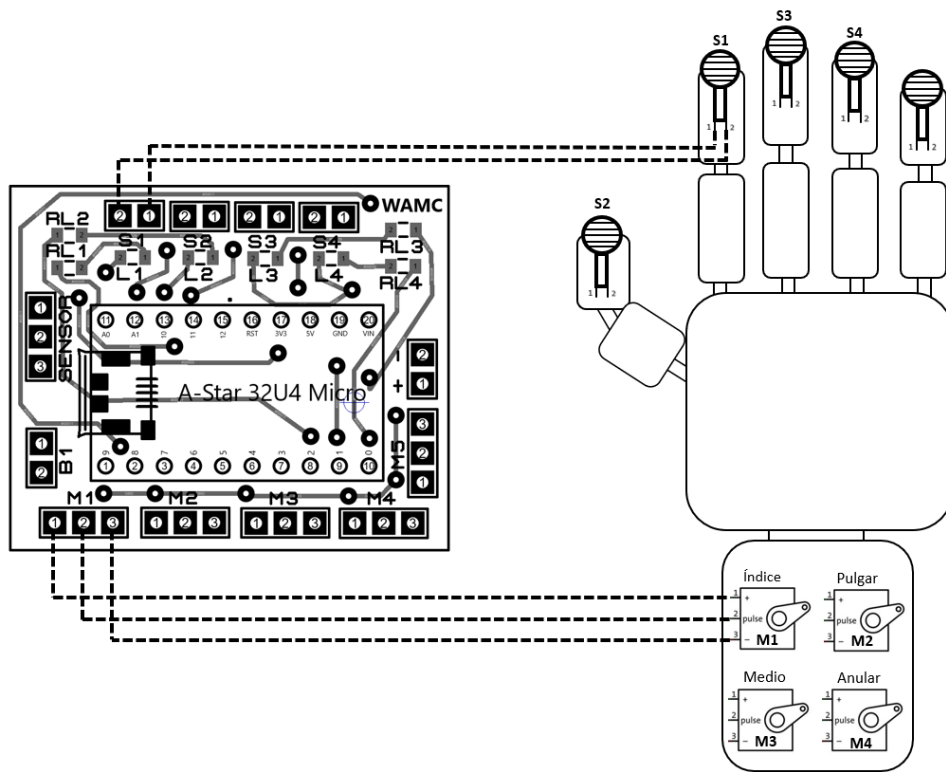


Ilustración 36: Conexiones sistemas sensorial.

Los puertos S2 y M2 se conectan al dedo pulgar en la misma dinámica que el dedo índice mostrado en la ilustración anterior.

4.3.4. Caracterización

Se realizaron mediciones de fuerza con respecto al voltaje, con el propósito de determinar una función de caracterización del sensor. Este proceso se realizó fijando pesos calibrados en el área de contacto del sensor, registrando el voltaje generado. En la **tabla 11** se puede observar los datos adquiridos.

Masa	Voltaje	Resistividad
20g	0,21V	228k Ω
40g	0,42V	109k Ω
60g	0,72V	59k Ω
80g	1,21V	31k Ω
100g	1,57V	21k Ω

Tabla 11: Medición de masa en función de voltaje y resistividad.

En la tabla anterior se puede evidenciar el valor de la señal resultante del sensor táctil al ser sometido a diferentes cargas, además se muestra la variación de resistividad con respecto a la deformación.

Con la información presentada en la **tabla 11**, se realiza el proceso de caracterización del sensor. Antes de realizar una función de caracterización se calculó la dinámica de medida con la siguiente ecuación:

$$Dinamica\ de\ medida = \frac{Rango\ salida}{Rango\ entrada} \quad (19)$$

El rango de salida se calcula restando el valor máximo con el valor mínimo de voltaje medido por el sensor. El rango de entrada se calcula restando el valor máximo con el valor mínimo de masa estimulado en el sensor.

$$\frac{(1,57 - 0,21)V}{(100 - 20)g} = 17\ mV/g$$

De las ecuaciones anteriores se puede analizar que el sensor por cada $17\ mV$ equivale a un gramo de masa. Con las dinámicas de medida se realiza la función de caracterización. Para calcular la masa de un objeto por medio del sensor de fuerza resistor, se debe emplea las siguientes ecuaciones:

$$Masa = \frac{Voltaje\ de\ salida - 0,21V}{17\ mV/g} + 20g$$

La ecuación anterior presenta la función característica del sensor. La señal de salida del sensor se le resta el voltaje inicial ($0,21V$) del sistema presentado en la **tabla 11** y después se divide por la dinámica de medida ($17\ mV/g$) calculada anteriormente y finalmente se compensa la ecuación sumando la masa inicial ($20g$) obteniendo como resultado el valor de la carga detectada por el sensor táctil. Se inició la medición a partir de los $20g$, debido que al rango de sensibilidad de fuerza del sensor es de $20g$ a $10kg$, los valores menores a 20 gramos interfieren en la medición y caracterización del sensor, debido a que presenta una zona muerta. En la **tabla 12** se puede detallar los valores prácticos adquiridos por las mediciones y el valor teórico obtenido por las ecuaciones de caracterización.

Masa		Voltaje
Teóricos	Prácticos	
20g	20,0g	0,21V
40g	32,3g	0,42V
60g	50,0g	0,72V
80g	78,8g	1,21V
100g	100,0g	1,57V

Tabla 12: Valores teóricos y prácticos de la caracterización del sensor.

Analizando los datos de la **tabla 12**, se detalla un comportamiento particular: los valores mínimos y máximos de masa se acercan más a su valor práctico, y los valores que están entre ese rango se distorsionan un poco, esto es debido a que la ecuación planteada se ajusta al rango definido entre el valor mínimo y máximo. Si se desea trabajar con valores superiores a los planteados en la tabla, se debe ampliar el rango de medición del sensor, y realizar un nuevo ajuste. El rango trabajado es empleado para la detección de piezas pequeñas, ya que este sistema de sensado táctil solo es aplicado en agarres de precisión.

5. DESARROLLO DE UNA MATRIZ SENSORIAL

En la representación del sentido del tacto en una mano robótica, se emplean diferentes metodologías para generar esta característica importante en la detección de objetos, métodos como sensores sensibles a la fuerza instalados en la yema de los dedos, localización estratégica en el prensado de objetos. Para mejorar la habilidad de sentir de una mano robótica, se debe ampliar el sentido del tacto a otras zonas como la palma de la mano, que abarca una gran área en el sistema sensorial, además permite establecer las dimensiones de una pieza que se ha aferrado, gracias a sus receptores sensoriales o terminaciones nerviosas que abarcan toda la piel de una mano.

Se diseñó un sensor táctil capaz de detectar un objeto y localizar sus coordenadas dentro de su área de contacto, con el propósito de ser abarcada en la palma de una mano generando mayor aplicabilidad en los sistemas sensoriales de una prótesis o mano robótica. Por medio de una geométrica en forma de matriz se fabrican los sensores táctiles, con un grosor delgado y con materiales con la textura de una piel real. La característica de localizar objetos en un plano cartesiano permite a una mano robótica mejorar los agarres en casos de que el objeto se ha sostenido de forma errónea, ideal para instalarlo en una palma de mano.

5.1. SELECCIÓN DE MATERIALES

Se compararon dos materiales diferentes sensibles a la deformación para la fabricación del sensor matricial. En la **tabla 13** se puede evidenciar la selección del material.

Característica	Velostat	NW170-PI-20
Costo	4	2
Adquisición	3	2
Precisión	4	4
Instalación	4	4
Total	15	12

Tabla 13: Selección material piezorresistivo.

En la tabla anterior se puede evidenciar la comparación de los diferentes materiales piezorresistivos. El Velostat presenta la mayor puntuación con respecto al otro material por su costo y adquisición del producto. Este material es fabricado especialmente para la elaboración de sensores sensibles a la fuerza, presentando un grosor similar a una hoja de papel, ideal en la fabricación de sensores extremadamente delgados y ligeros, adaptativos a cualquier zona de una mano robótica.

Se diseñó un sensor táctil delgado, elaborado por método de adición de diferentes capas aislantes, conductoras y piezorresistivas, capaz de detectar y localizar un objeto en un plano cartesiano por medio de puntos en forma de matriz, se realizó una piel táctil para la palma de una mano o prótesis robótica. En la parte de anexos del documento se presenta la ficha técnica del material (ANEXO 4).

5.2. DISEÑO DE SENSOR MATRICIAL

5.2.1. Geometría

En el diseño de una piel artificial sensorial se estableció diferentes geometrías en forma de matrices para establecer la configuración del sensor. En la **ilustración 37** se puede evidenciar diferentes configuraciones matriciales del sensor táctil.

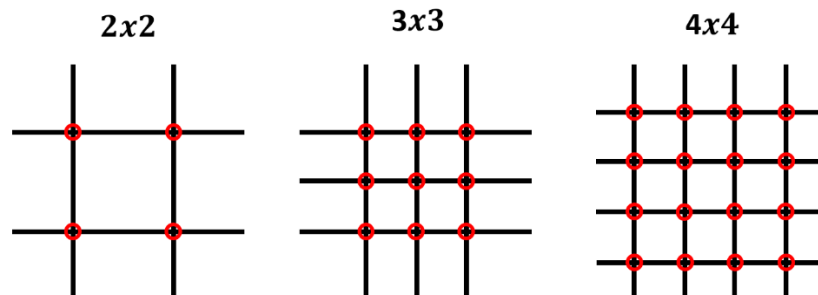


Ilustración 37: Configuraciones matricial sensor táctil.

Los puntos rojos visualizados en la ilustración anterior representan los puntos críticos del sensor matricial, debido a que es la zona con menor resistividad en el material piezorresistivo y representan las coordenadas a detectar. El sensor está fabricado por tres capas fundamentales, una capa con material sensible a la presión y dos capas con material conductoro localizados en la partes posterior e inferior del material piezorresistivo. Las franjas horizontales y verticales representan la capa posterior e inferior del sensor táctil, cada línea es una lámina de material conductoro que permite obtener la señal del sensor en la coordenada deseada.

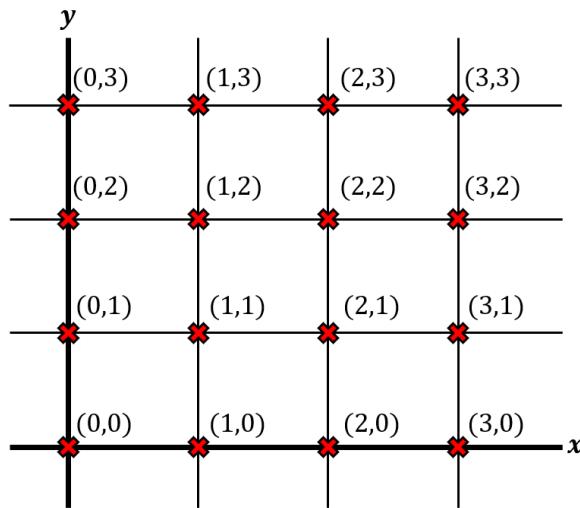


Ilustración 38: Coordenadas sensor matricial.

Se seleccionó una matriz 4x4 para la fabricación del sensor, su configuración y coordenadas se observan en la **ilustración 38**. Entre mayores coordenadas presente el sensor, mayor será la resolución al detectar o localizar objetos. Desde un plano cartesiano, la piel sensorial tendrá la habilidad de localizar objetos dentro del área del sensor táctil.

5.2.2. Fabricación

En la adquisición de la resistividad del material piezorresistivos se debe instalar material conductor en la capa superior e inferior para obtener la señal variable que permitirá al sensor detectar objetos.

La manufactura de la piel sensorial se realiza por la unión de capas conductoras, aislantes y piezorresistivas. La configuración definida para el diseño de la piel sensorial es de una matriz 4x4, fabricado por medio de láminas de cobre en forma horizontal (capa 1) y vertical (capa 3). El núcleo del sensor es una lámina de Velostat (capa 2). En la **ilustración 39**, se puede observar la geometría presentada en el sensor matricial, evidenciando las diferentes capas con su configuración.

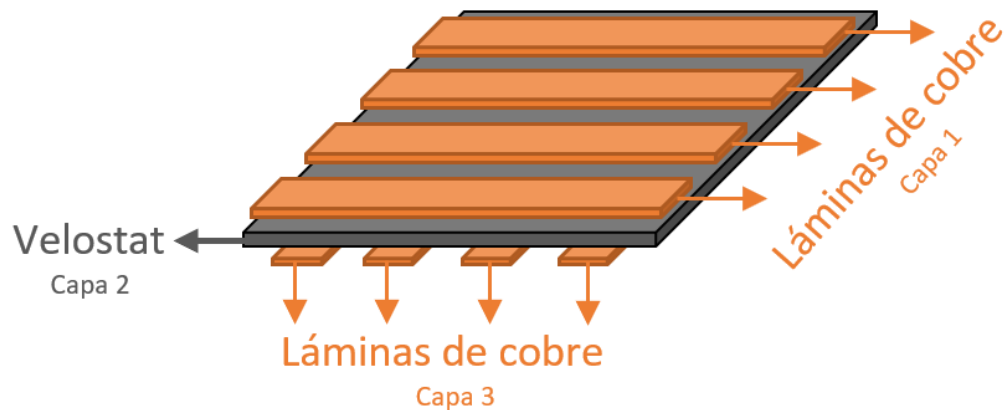


Ilustración 39: Configuración matricial de la piel sensorial.

Las capas de la piel sensorial se realizaron al tamaño de la palma de una mano promedio. La capa 1 y 2 están conformadas por cinta de cobre y acetato calibre 4, por medio del adhesivo que conforma la cinta de cobre se fija el conductor en toda la lámina del acetato conformando una capa de material aislante y otra capa de material conductor. En la **ilustración 40** se puede observar las capas físicas del sensor matricial.



Ilustración 40: Capas de la matriz sensorial.

Para obtener la señal y procesarla es necesario instalar el cableado en los diferentes electrodos de cobre que conforman la matriz sensorial. La soldadura de los cables

se realiza en la parte posterior de las capas conductivas, por medio de una pequeña pestaña de cobre. A continuación, se puede presenciar la soldadura del cableado:

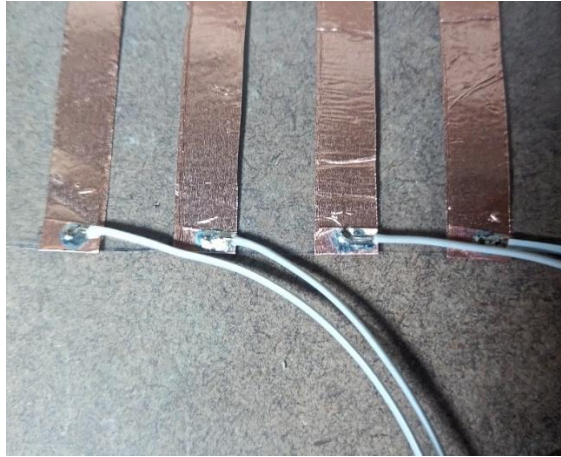


Ilustración 41: Soldadura del cableado de la matriz sensorial.

Al instalar todo el cableado para la adquisición de la señal del sensor se procede a fijar todas las capas de la piel sensorial con cinta adhesiva, el resultado se puede observar a continuación:



Ilustración 42: Fijación de las capas y cableado de la matriz sensorial.

En el proceso de fijación de las capas, se ordena todo el cableado en los bordes del sensor e interceptando todo en una sola esquina, con la finalidad de que el cableado no interfiera en las mediciones. Para aumentar la adherencia de los diferentes objetos a sostener, se debe aplicar una capa de material elastómero para generar mayor agarre, por medio de un molde diseñado en 3D, se aplica Dragon Skin en

toda la superficie del sensor táctil, generando un sensor con acabado, textura y propiedades mecánicas similares a la piel humana, además el material distribuye mejor las cargas a detectar en los electrodos de cobre que conforman la piel sensorial. En la **ilustración 43** se puede observar el molde para el proceso de curado del sensor y en la **ilustración 44** el prototipo final.

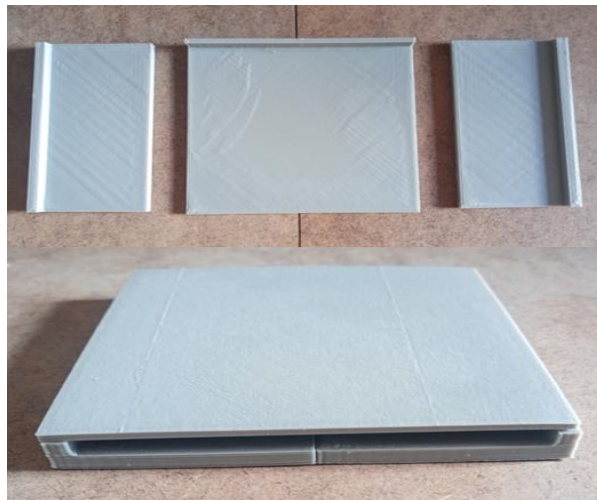


Ilustración 43: Molde para proceso de curado de la matriz sensorial.



Ilustración 44: Prototipo final matriz sensorial.

El grosor de la matriz sensorial es de aproximadamente 4mm, este tamaño se puede cambiar rediseñando el molde de curado, realizándolo más grueso o delgado, dependiendo de la aplicación que requiera. El área abarcada por el sensor es de 80mm de largo y ancho, en la **ilustración 45** se puede visualizar el tamaño de la piel sensorial con respecto a una mano. En la parte de anexos del documento se presentan los planos mecánicos de la matriz sensorial (ANEXO 1).

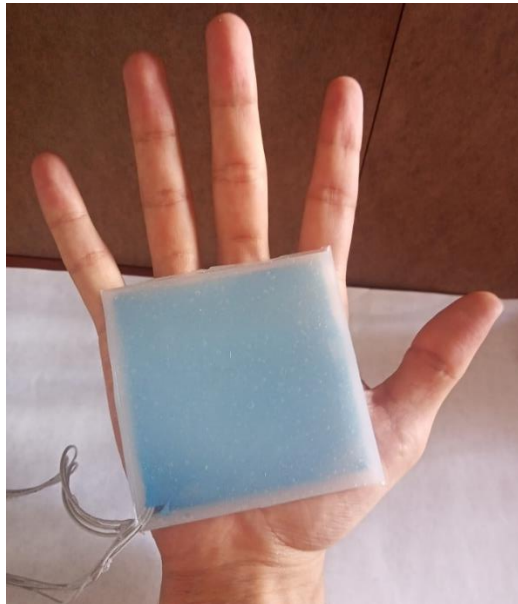


Ilustración 45: Dimensiones entre matriz sensorial y una mano.

En la **ilustración 46** se puede visualizar detalladamente las diferentes capas que conforman el sensor táctil con núcleo de Velostat.

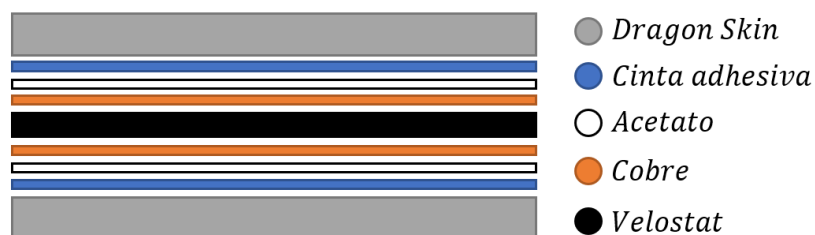


Ilustración 46: Descripción de las diferentes capas del sensor táctil.

En el diagrama anterior se puede evidenciar la composición del sensor táctil, se presentan diferentes capas con 5 materiales distintos. El primero es el núcleo conformado por un material piezorresistivo que permite darle funcionalidad al sensor, variando su resistividad en casos de estrés mecánico. Las siguientes capas son conductivas compuestas por láminas de cobre que permiten obtener la señal del material sensible a la presión. Las láminas de acetato cumplen con la funcionalidad de sostener las láminas de cobre evitando deformaciones en el conductor. La cinta adhesiva fija todas las capas internas evitando descalibrar la alineación entre capas. El Dragon Skin ofrece un mejor acabado al sensor, aumenta el agarre y protege las capas más internas por cargas aplicas en el sensor táctil.

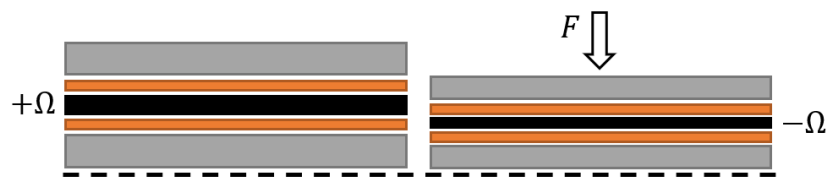


Ilustración 47: Diagrama deformación de las capas del sensor.

En la **ilustración 47** se puede visualizar la funcionalidad de las capas del sensor. Cuando se aplica una fuerza, las capas más externas conformadas por la silicona líquida distribuyen la carga ejercida a las demás capas internas del sensor, deformando el núcleo provocando variación en su resistividad. El Velostat al ser sometido a una presión este se comprime, disminuyendo la distancia entre las partículas resistivas del material, provocando que el material baje su resistividad, a medida que el volumen disminuye la resistividad también disminuye.

5.2.3. Caracterización del material

Se realizaron ensayos de fuerza en el sensor táctil, por medio de una balanza se midió la carga ejercida en la capa más externa del sensor, comparándolo con la variación de la resistividad del Velostat. En la **ilustración 48** se puede evidenciar el ensayo realizado y en la tabla los resultados obtenidos.



Ilustración 48: Ensayo de fuerza del sensor táctil con Velostat.

Carga	Resistividad
0g	61,5k Ω
100g	3464 Ω
200g	1994 Ω
300g	1369 Ω
400g	1109 Ω
500g	872 Ω
600g	773 Ω
700g	677 Ω
800g	602 Ω
900g	557 Ω
1000g	492 Ω
1500g	436 Ω
3000g	234 Ω

Tabla 14: Resistividad en función de la carga del sensor táctil con Velostat.

En la **tabla 14** se puede evidenciar que la resistividad del material disminuye a medida que la carga aumenta. Las pruebas se realizaron hasta 3000g de carga debido a que es el valor máximo que se puede ejercer al material en la configuración realizada en la elaboración del sensor. Al sobrepasar la carga máxima del sensor este deja de variar en su resistividad. A continuación, se puede observar la tendencia en los valores obtenidos en los ensayos de fuerza del sensor:

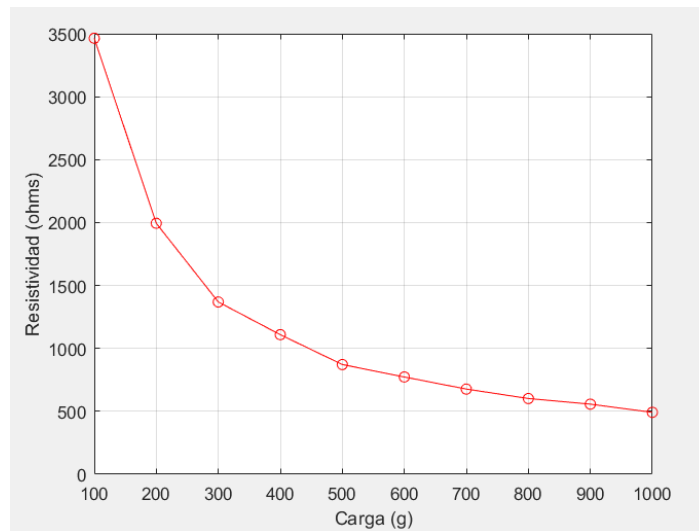


Ilustración 49: Grafica resistividad en función de la carga.

El comportamiento de la resistividad del material piezorresistivo es de una gráfica exponencial, a medida que la carga aumenta la resistividad tiende a cero. El sensor en estado de reposo inicia con una resistividad en su núcleo de $61,5\text{k}\Omega$, en los primeros 200g de carga, la resistencia cambia repentinamente hasta estabilizarse entre los 1000g. La ilustración observada anteriormente se evidencia el material y sensor no es lineal en su señal resultante.

En la detección de objetos de una prótesis o mano robótica se pueden establecer umbrales o zonas de aceptación entre una pieza detectada o no detectada, dependiendo de la fuerza ejercida de los actuadores que accionan los dedos de una mano robótica, por ejemplo, una zona de aceptación en la detección de objetos después de los 200g de carga, este valor varía en el proceso de calibrado del sensor con pruebas de torque en las falanges. También se puede linealizar el sensor para obtener resultados más precisos y mejorar la caracterización del sensor.

5.2.4. Linealización

La linealización de la señal de un sensor permite hallar una ecuación característica que permite determinar una propiedad física o química con base a una propiedad eléctrica en este caso por medio de una tensión se calcula la masa o fuerza ejercida en el sensor táctil. Una técnica en la linealización de un sensor es la instalación de una resistencia en paralelo en el material piezorresistivo. En un artículo (20) de la revista ingeniería de la Universidad Distrital, propone una ecuación para calcular la resistencia en paralelo, que permite reajustar una señal de salida exponencial a una señal lineal. A continuación, se muestra la ecuación mencionada:

$$R_L = \frac{R_{max}(R_{min} - R_{medio}) - p(R_{min} - R_{max})}{p(R_{min} - R_{max}) - R_{min} + R_{medio}}$$

$$p = \frac{Carga_{max} - Carga_{medio}}{Carga_{max} - Carga_{min}}$$

Con base a los resultados obtenidos en la **tabla 14** se extraen los valores necesarios para efectuar la ecuación anterior.

Carga minima: 0g – 61,5kΩ
Carga media: 1500g – 436Ω
Carga maxima: 3000g – 234Ω

$$p = \frac{3000g - 1500g}{3000g - 0g} = 0,5$$

$$R_L = \frac{61,5k\Omega(234\Omega - 436\Omega) - 0,5(234\Omega - 61,5k\Omega)}{0,5(234\Omega - 61,5k\Omega) - 234\Omega + 436\Omega} = 407\Omega$$

El valor de la resistividad en paralelo obtenida es de 407Ω, al realizar el reajuste de los valores se obtienen los siguientes resultados:

Carga	Resistividad	
	Lineal	No lineal
0g	404Ω	61,5kΩ
100g	364Ω	3464Ω
200g	338Ω	1994Ω
300g	313Ω	1369Ω
400g	297Ω	1109Ω
500g	277Ω	872Ω
600g	266Ω	773Ω
700g	254Ω	677Ω
800g	242Ω	602Ω
900g	235Ω	557Ω
1000g	222Ω	492Ω
1500g	210Ω	436Ω
3000g	148Ω	234Ω

Tabla 15: Resistividad linealizada.

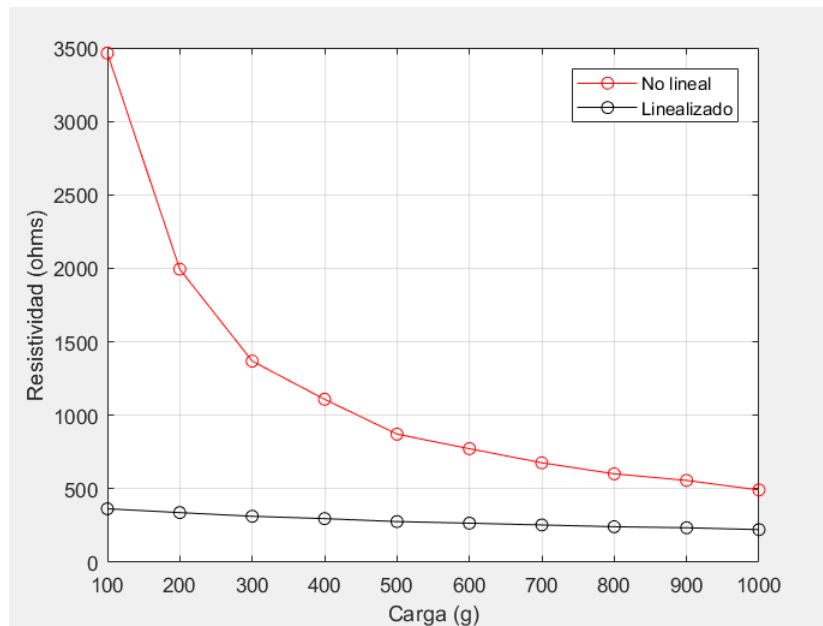


Ilustración 50: Relación entre señal No lineal y Linealizada.

En la tabla e ilustración anterior se puede evidenciar el reajuste de la señal al instalar la resistencia calculada en paralelo. Se visualiza un cambio considerado entre las dos señales, se detalla que la resistividad linealizada disminuye considerablemente el rango entre el valor mínimo y máximo, esto implica que el sensor táctil pierda sensibilidad en la detección de objetos ya que sus valores resistivos entre cada carga varían mínimamente.

Con base a los valores obtenidos en la linealización se procede a establecer el circuito de adquisición de la señal. Se selecciono una resistencia de 100Ω para la instalación del divisor de voltaje que generara la tensión resultante del sensor táctil. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Carga	Voltaje
0g	0,99V
100g	1,07V
200g	1,14V
300g	1,21V
400g	1,25V
500g	1,32V
600g	1,36V
700g	1,41V
800g	1,46V
900g	1,49V
1000g	1,55V
1500g	1,61V
3000g	2,01V

Tabla 16: Voltaje de salida del sensor en función de la carga.

Al obtener los voltajes en función de la carga se procede a calcular la dinámica de medida con la siguiente ecuación:

$$Dinamica\ de\ medida = \frac{Rango\ salida}{Rango\ entrada}$$

$$\frac{(1,55 - 1,07)V}{(1000 - 100)g} = 0,53\ mV/g$$

El rango de caracterización del sensor se definió entre 100 hasta los 1000g para ajustar mejor la ecuación del sensor, debió a que los valores de voltaje antes de los 100g y después de los 1000g distorsiona el cálculo de la dinámica de medida y la ecuación general del sensor táctil. A continuación, se muestra la ecuación característica del sensor táctil:

$$Masa = \frac{V_{out} - 1,07V}{0,53\ mV/g} + 100g$$

La ecuación calcula la carga con base al voltaje resultante del sensor táctil. La tensión le resta el voltaje mínimo del rango de caracterización y lo divide en la

dinámica de medida y al resultado final se le compensa con la carga inicial. En la **tabla 17** se puede observar los resultados obtenidos.

Voltaje	Carga	
	Real	Teórica
1,07V	100g	100g
1,14V	200g	232g
1,21V	300g	364g
1,25V	400g	439g
1,32V	500g	571g
1,36V	600g	647g
1,41V	700g	741g
1,46V	800g	835g
1,49V	900g	892g
1,55V	1000g	1005g

Tabla 17: Valores Teóricos y reales de la caracterización del sensor.

En la tabla anterior se puede evidenciar una diferencia entre los valores reales y teóricos calculados por la ecuación característica del sensor, esto puede ser debido a los porcentajes de error en los ensayos de fuerza con la balanza, ya que es un procedimiento difícil de realizar, también algunos resultados de las pruebas influyen negativamente en el proceso de caracterización del sensor.

El sensor táctil con núcleo de Velostat se puede usar de forma no lineal, estableciendo zonas o umbrales de aceptación entre sentir y no sentir un objeto, ideal para la detección de piezas pequeñas por su alta sensibilidad. El sensor linealizado se aplica en casos que se necesita alta precisión en la fuerza ejercida al sostener un objeto, pero sacrificando la sensibilidad por su mínimo rango de variación.

5.2.5. Multiplexación

En la fabricación de la matriz sensorial con dimensiones 4x4, se deben monitorear 16 coordenadas diferentes. Para obtener los 16 puntos de intersección simultáneamente se deben utilizar 16 entradas análogas de un microcontrolador para adquirir todas las señales emitidas por la piel artificial. El número de puertos a utilizar es demasiado, se deben utilizar microcontroladores más grandes y costosos que satisfagan las necesidades del sensor matricial. Una técnica utilizada en la iluminación de pixeles en pantallas y display es la multiplexación, permite utilizar

menos puertos para la transmisión de información, es decir se puede adquirir varias señales en un mismo medio de transmisión. Esta técnica permite pasar de 16 puertos análogos a solo 4, y añadiendo 4 puertos más que permitirán realizar la conmutación de la matriz sensorial. Por medio de transistores de alta velocidad de conmutación se realiza la multiplexación entre las filas y columnas del sensor matricial. En la **ilustración 51** se puede observar la configuración mencionada.

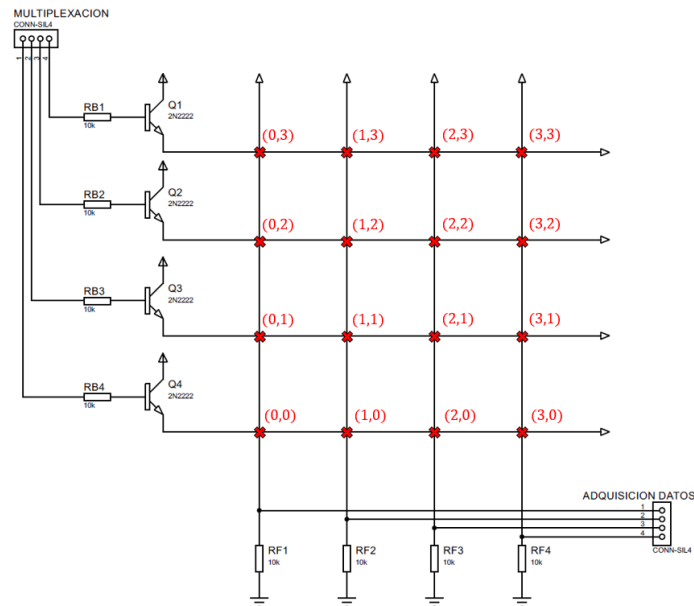


Ilustración 51: Configuración del circuito de multiplexación.

En la ilustración anterior se puede evidenciar los puntos críticos marcados en rojo que definen las coordenadas establecidas en la fabricación del sensor matricial. Las líneas horizontales y verticales representan las capas de láminas de cobre que cubren el material piezorresistivo, en este caso la primera capa está conectada con los transistores que realizarán la respectiva conmutación y la segunda capa conecta las resistencias fijas del divisor de voltaje. Entre los puntos de intersección se genera la variación de resistividad al aplicar una presión en el área crítica del sensor. La multiplexación se realiza energizando individualmente las láminas horizontales y simultáneamente se obtienen la señal en los cuatro puntos de las láminas verticales donde circula el flujo eléctrico en ese instante. En cuatro conmutaciones se obtiene los valores de las 16 coordenadas de la matriz sensorial. El proceso se realiza a una alta frecuencia para simular la obtención de todos los puntos simultáneamente, evitando presenciar retardos en la adquisición de la señal. En la siguiente tabla se muestra diferentes dimensiones de matrices con la cantidad de puertos necesarios para su multiplexación:

Dimensión Matriz	Entradas Análogas	Salidas Digitales	Cantidad Coordenadas
2x2	2	2	4
4x4	4	4	16
6x8	6	8	48
8x6	8	6	48
10x20	10	20	300
30x30	30	30	900

Tabla 18: Cantidad de puertos necesarios para diferentes matrices.

En la **tabla 18** se puede observar la cantidad de puertos de entrada y salida necesarios para realizar la multiplexación de diferentes matrices, además se muestra la cantidad de coordenadas que generan cada matriz. Entre mayor sea las dimensiones de la matriz mayor será la resolución del sensor y la cantidad de puertos del microcontrolador también aumentara.

5.2.6. Placa electrónica

Se realizó una placa electrónica que permita realizar la multiplexación del sensor matricial y obtener la señal resultante. La placa se diseñó lo más pequeña posible con componentes de tecnología superficial para ser instalados en una palma o antebrazo de una prótesis o mano robótica dependiendo de sus dimensiones. En las **ilustraciones 52** se puede observar la placa electrónica diseñada.

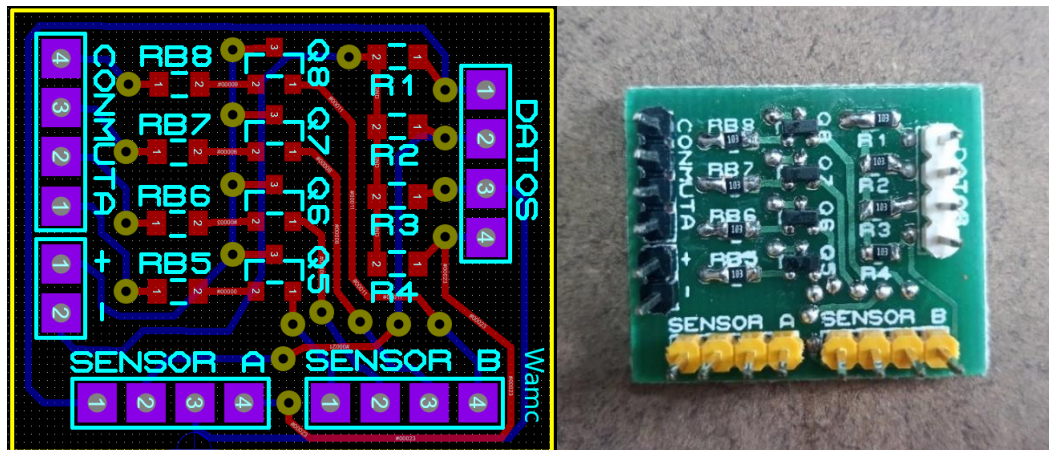


Ilustración 52: PCB multiplexación del sensor matricial.

La placa electrónica está conformada por diferentes puertos que permiten conmutar y adquirir la señal de la matriz sensorial. Presenta 8 puertos para la conexión del cableado interno de las láminas de cobre con el circuito eléctrico. Los puertos “SENSOR A” se conectan a las láminas horizontales y los puertos “SENSOR B” se conectan a las láminas verticales del sensor. Los puertos “CONMUTA” permiten saturar los transistores para realizar la conmutación necesaria en la adquisición de la señal. Los puertos “DATOS” generan la señal resultante del sensor para posteriormente ser adquirida por el conversor ADC del microcontrolador. En la parte de anexos del documento se presentan los planos eléctricos del circuito de multiplexación del sensor matricial (ANEXO 2). A continuación, se observa la proporción de tamaño de la placa electrónica con respecto a una mano y una moneda:

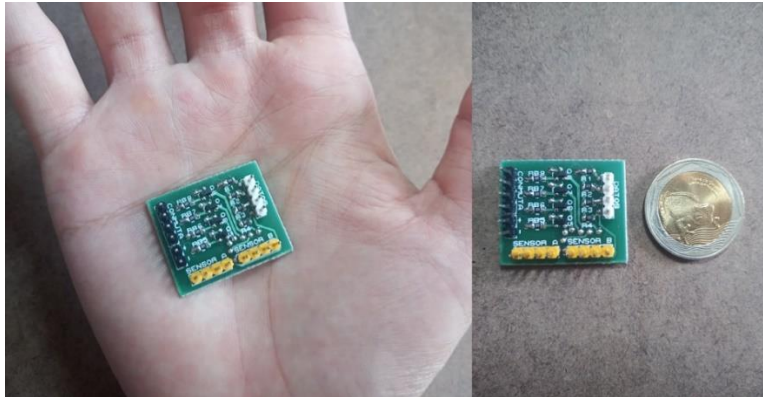


Ilustración 53: Proporción PCB sensor matricial.

5.2.7. Software de lectura de datos

La señal transmitida por el sensor matricial se debe analizar de forma interactiva, para percibir el comportamiento de cada coordenada del sensor. Se realizó un programa en Matlab con interfaz gráfica que permite visualizar el estado de cada punto de intersección de la matriz. En la **ilustración 54** se puede visualizar la interfaz gráfica del programa de lectura de datos del sensor matricial.

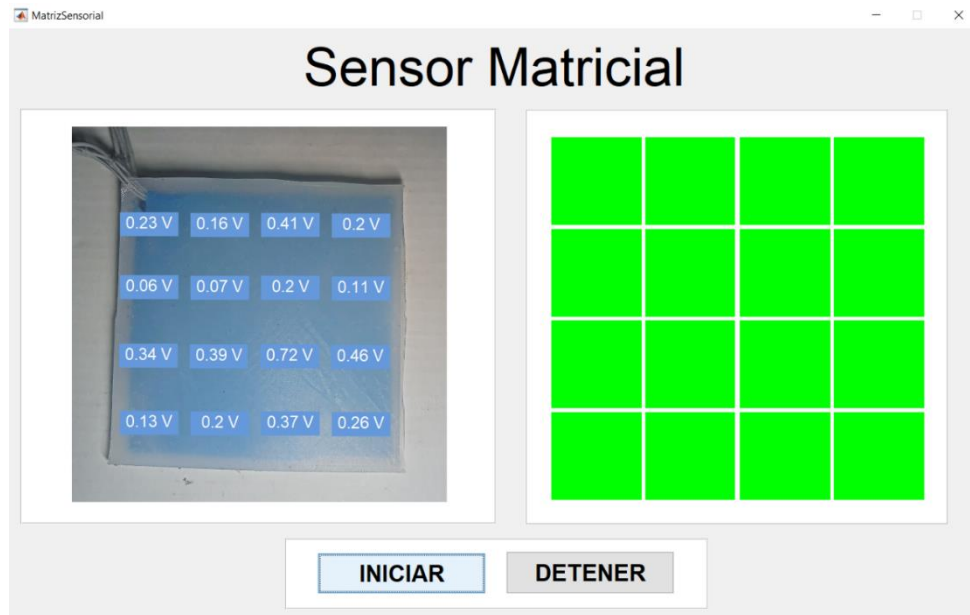


Ilustración 54: Interfaz gráfica programa de lectura de datos.

En la interfaz gráfica se presenta dos secciones distintas, la primera representa los voltajes de salida en cada coordenada del sensor y en la segunda sección presenta la visualización del estado de cada punto crítico por medio de colores, con la finalidad visibilizar interactivamente la información recopilada del sensor.

El microcontrolador envía la información de los estados de todas las coordenadas por medio de comunicación serial leído desde un algoritmo en Matlab. La transmisión se realiza desde un script en C ejecutado desde el microcontrolador. Se envía un arreglo de 16 valores diferentes separados por comas con la finalidad de realizar su respectiva segmentación desde un sistema operativo.

El programa presenta una matriz 4x4 iluminada de color verde, esto representa que todos los puntos críticos del sensor están en reposo, es decir no se está ejerciendo presión en el área. Para representar la intensidad de la presión ejercida en cada punto de intersección se realiza un cambio de tonalidad en la interfaz, el color amarillo representa una presión leve o intermedia y el color rojo representa una presión moderada o máxima. En las **ilustraciones 55 y 56** se puede visualizar el comportamiento mencionado.

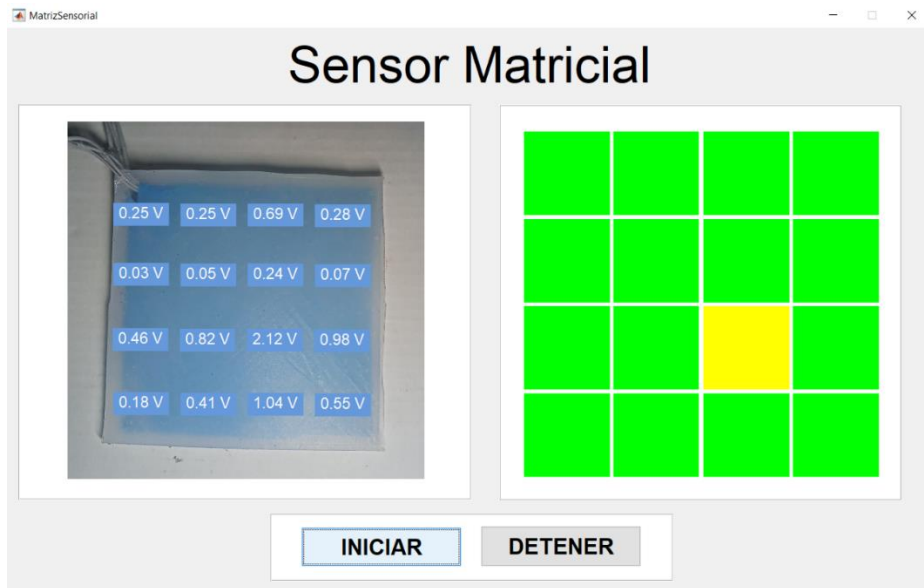


Ilustración 55: Representación de presión leve en un punto del sensor.

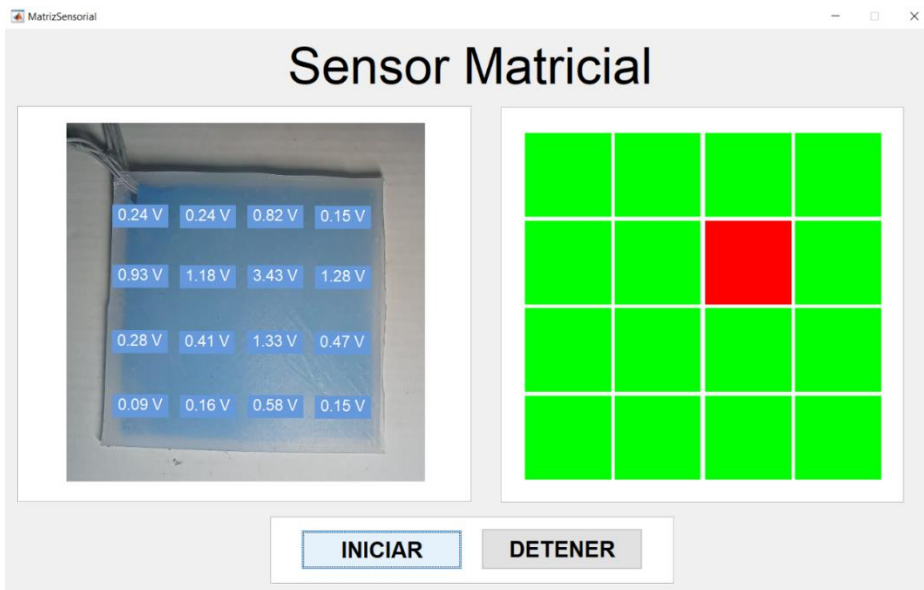


Ilustración 56: Representación de presión moderada en un punto del sensor.

La definición de la presión leve y moderada en el programa se establece realizando pruebas de ensayo de fuerza seleccionando zonas de aceptación e intensidad que permiten al algoritmo detectar objetos e identificar la magnitud de la carga con su respectiva ubicación.

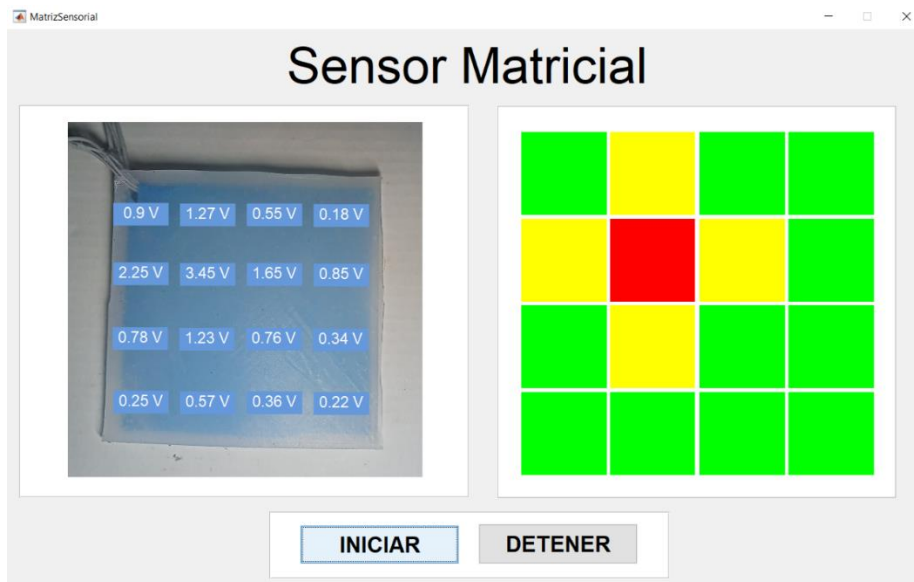


Ilustración 57: Mapeo de intensidad de carga de la matriz sensorial.

En la **ilustración 57** se evidencia el mapeo de intensidad de la carga en el sensor matricial, se puede observar que la presión se distribuye en forma de cruz en la superficie del sensor. La tensión en la coordenada iluminada de color rojo es mayor que las coordenadas visualizadas de color amarillo, detallando la geométrica de la fuerza ejercida.

La calibración del sensor matricial se debe realizar algorítmicamente, debido a que cada punto crítico se debe calibrar de forma individual, definiendo zonas de aceptación e intensidad en las diferentes coordenadas del sensor.

En estado de reposo del sensor los voltajes son diferentes en cada punto crítico, esto puede ser debido a errores mínimos en el proceso de ensamblaje de las capas y fabricación del sensor matricial, provocando variación en la resistividad en cada intersección.

El mapeo de la intensidad de las cargas permite a la piel artificial detectar un objeto obteniendo su magnitud y la localización de la pieza en un plano cartesiano, en este caso en toda la superficie de la matriz sensorial, aumentando la aplicabilidad en el sentido táctil de prótesis y manos robóticas.

6. RESULTADOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Para analizar el comportamiento de los diferentes prototipos de sensores táctiles desarrollados para una mano robótica, se realizaron pruebas de detección de objetos mediante agarres de precisión y de potencia. En la suspensión de piezas se seleccionaron objetos de diferentes tamaños, dimensiones y geometrías, para observar el comportamiento del sensor. El segundo prototipo se enfatizó solamente en el agarre de precisión, por limitaciones de costos en el sistema, se instalaron únicamente en los dedos pulgar e índice.

Se efectuaron pruebas de mapeo en el sensor táctil matricial con diferentes objetos, observando su intensidad de la carga y posición. Por medio del software de lectura de datos se evidencia las dimensiones y la localización de la pieza, visualizados en la interfaz gráfica desde una matriz representando la intensidad de la presión por medio de colores.

6.1. PROTOTIPO 1: SENSOR TÁCTIL CON ESPUMA CONDUCTIVA

Se instaló en las falanges distales de la mano robótica (14) el mecanismo de activación en forma de bisagra de los sensores táctiles de espuma conductiva. Se acopló los tendones flexores y extensores de todos los dedos de la mano para realizar pruebas de agarres de precisión y de potencia. En la **ilustración 58** se puede observar la mano robótica con los sensores instalados.

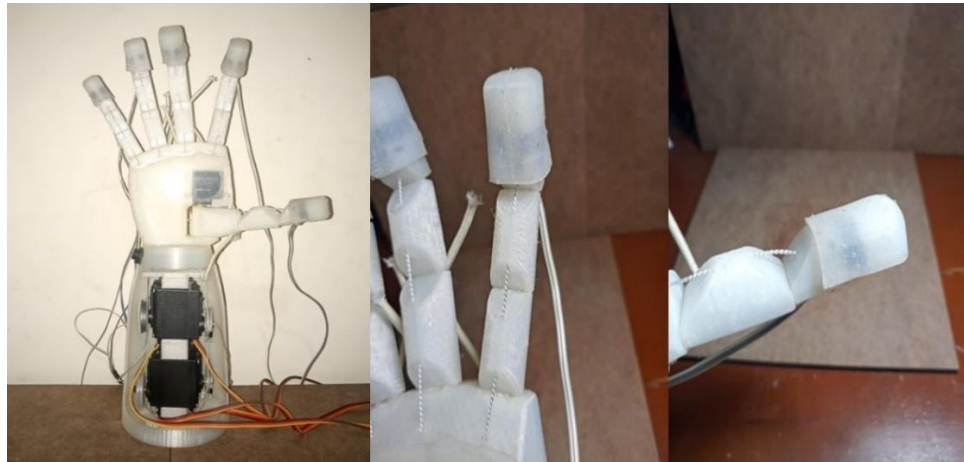


Ilustración 58: Mano robótica con sensor táctil con espuma conductiva.

Para efectuar los agarres de precisión y potencia, se debe calibrar los sensores táctiles de espuma conductiva. Se procede a definir un umbral de aceptación en la detección de piezas, para que el sistema valide los estados de los sensores y determine cuando un objeto se ha detectado. En la **ilustración 59** se puede observar el prensado de diferentes objetos por medio de la mano robótica.

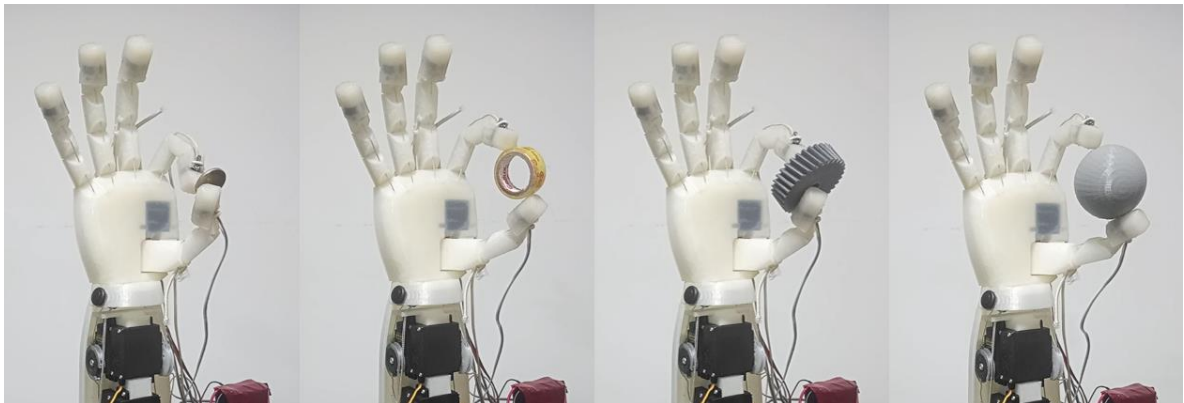


Ilustración 59: Detección de diferentes objetos.

En la ilustración anterior se puede visualizar el agarre de una moneda, un rollo de cinta, un engranaje y una esfera por la mano robótica. Se evidencia la adaptación del sistema a las dimensiones de los diferentes objetos a detectar, acoplándose correctamente a su tamaño, generando la suficiente fuerza para prensar las piezas. Los sensores táctiles permiten regular la fuerza ejercida por los actuadores, evitando que el sistema genere fuerzas diminutas provocando la caída de los objetos o en el caso contrario una fuerza excesiva que genere la deformación de los objetos prensado o en daños en los actuadores y en la estructura de la mano robótica. En la **tabla 19** se puede evidenciar la señal obtenida.

Dedos	Voltaje			
	Moneda	Engranaje	Cinta	Esfera
Pulgar	0,24V	0,35V	0,25V	0,37V
Índice	0,14V	0,21V	0,16V	0,22V

Tabla 19: Señal de salida agarre de precisión prototipo 1.

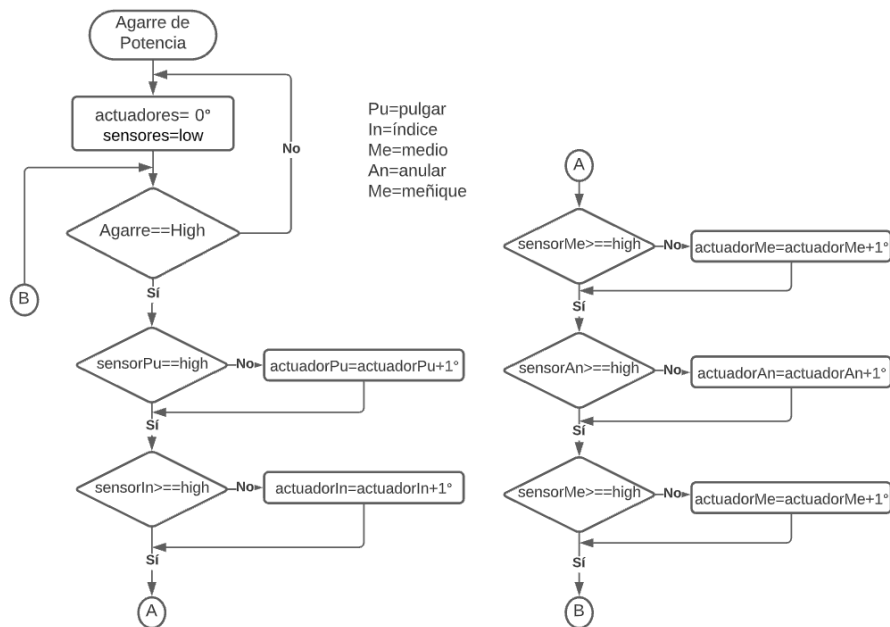


Ilustración 60: Diagrama de flujo agarre de potencia.

En la **ilustración 60** se puede evidenciar el diagrama de flujo del agarre de potencia. La lógica que presenta el algoritmo de este agarre es de esperar la orden del usuario u operario en realizar el accionamiento del agarre correspondiente, los actuadores cierran homogéneamente todos los dedos de la mano robótica, validando grado por grado el estado de cada sensor táctil. Cuando un determinado dedo detecte un objeto, el actuador de ese dedo se detiene manteniendo la última posición aferrando la pieza en la zona detectada, hasta que los demás dedos detecten las demás áreas del objeto, esta lógica permite a cada uno de los dedos la mano robótica en moldearse a la geometría de un objeto. A continuación, se muestra la secuencia del agarre de potencia con diferentes objetos:



Ilustración 61: Secuencia de agarre de potencia de una esfera.

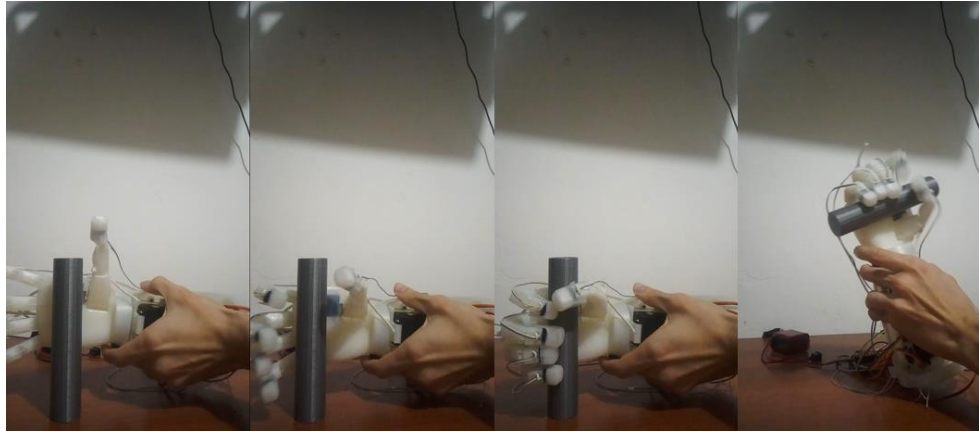


Ilustración 62: Secuencia de agarre de potencia de un tubo.

En la **ilustración 61** se observa el prensado de una esfera por medio de garre de potencia, se evidencia que los dedos de la mano robótica se ajustan a las dimensiones de la esfera. El dedo pulgar y medio se cierran con ángulos similares, debido a que el área de contacto de estos dedos es en la parte lateral de la esfera, en cambio el dedo índice tiene un ángulo de cierre mucho menor, debido a que el área de contacto es en la parte más alta de la esfera con respecto a la palma de la mano. Los dedos anular y meñique presentan el máximo ángulo de cierre debido a que estos dedos no presenta contacto directo con el objeto a detectar, es decir los sensores en esos dedos no detectaron la esfera.

El agarre de potencia de un tubo presentado en la **ilustración 62**, se evidencia que todos los dedos se cerraron con ángulos similares, debido a la uniformidad del tubo, es decir el objeto se presio en un área totalmente horizontal, acoplado los dedos homogéneamente. En la detección del tubo por la mano robótica, se evidencia que los sensores táctiles se han activado al mismo tiempo y el objeto a detectar abarca toda la palma de la mano. Todos los sensores táctiles se activaron al manipular el tubo, en cambio la esfera solo se activaron 3 sensores de 5. Con las variables anteriores se puede determinar las posibles dimensiones de un objeto.

Dedos	Voltaje	
	Esfera	Tubo
Pulgar	1,21V	1,23V
Índice	0,97V	0,73V
Medio	0,74V	0,34V
Anular	0,00V	0,14V
Meñique	0,00V	0,10V

Tabla 20: Señal de salida agarre de potencia.

6.2. PROTOTIPO 2: SENSOR TÁCTIL DE FUERZA RESISTIVO

Se acoplaron los sensores táctiles de fuerza resistiva en la falange distal de los dedos índice y pulgar para realizar pruebas en la detección de objetos por medio de agarres de precisión. La instalación del sensor se realiza introduciendo los tendones extensores y flexores en las cavidades de las demás falanges de los dedos, fijando el tendón extensor en la parte trasera de la palma de la mano y el tendón flexor fijado en los actuadores que realizan el movimiento de la mano robótica. En la **ilustración 63** se puede observar la mano robótica con los sensores instalados.



Ilustración 63: Mano robótica con sensor táctil de fuerza resistivos FSR.

Al ejecutar el agarre de precisión se debe alinear verticalmente la yema del dedo índice y pulgar para efectuar correctamente el prensado y detección de objetos. A través de un actuador fijado en la palma de la mano se realiza el movimiento del dedo pulgar redireccionándolo debajo del dedo índice y posteriormente se realizando el cierre de los dedos por medio de dos actuadores ubicados en el antebrazo de la mano robótica. A continuación, se muestra la detección de diferentes objetos de una mano robótica mediante los sensores táctiles:

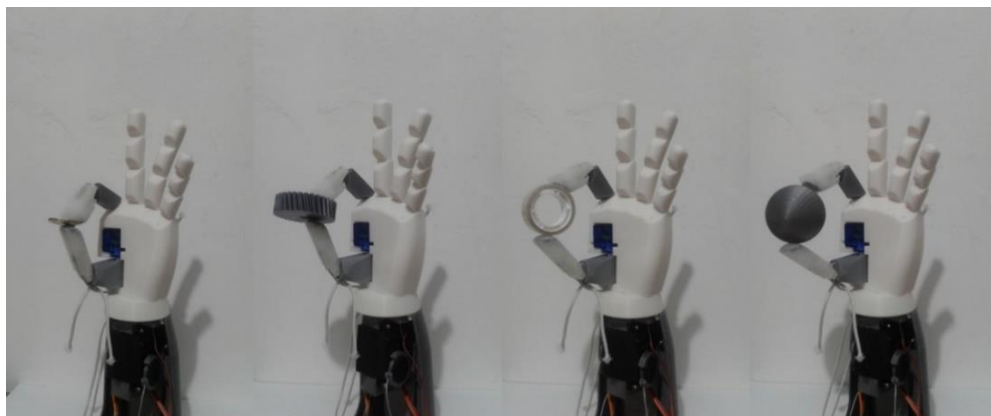


Ilustración 64: Agarre de precisión de diferentes objetos.

En la **ilustración 64** se puede observar el agarre de diferentes objetos como una moneda, engranaje, rollo de cinta y esfera. La facilidad de la mano al sostener las diferentes piezas es debido al recubrimiento de silicona (Dragon Skin) que presenta la yema de los dedos, generando un agarre suficiente para afianzar los objetos y mantenerlos prensados y firmes. Se puede evidenciar que los dedos se adaptan al tamaño de la pieza a detectar, el sistema cierra uniformemente el índice y pulgar hasta que el algoritmo valide si los sensores táctiles han detectado un objeto, en el caso de que sí, los actuadores se detienen manteniendo la última posición sosteniendo el objeto

Antes de ejecutar el algoritmo del agarre de precisión se debe calibrar los sensores algorítmicamente, realizando pruebas de detección de objetos, se debe analizar la señal de salida cuando los dedos abarcan las dimensiones de una pieza, es decir que tensión genera los objetos cuando realizan contacto entre la yema de los dedos, más la fuerza ejercida por los actuadores. Al obtener la señal resultante se procede a establecer zonas de aceptación en la detección de objetos, en este caso los sensores generaron una tensión en el agarre de objetos menores a 1V, sosteniendo piezas con una masa por debajo de los 100g.

Dedos	Moneda		Engranaje		Cinta		Esfera	
	Voltaje	Carga	Voltaje	Carga	Voltaje	Carga	Voltaje	Carga
Pulgar	0,38V	30g	0,32V	26g	0,35V	28g	0,42V	32g
Índice	0,43V	32g	0,35V	28g	0,42V	32g	0,41V	31g

Tabla 21: Señal de salida agarre de precisión prototipo 2.

En la **tabla 21** se observa los voltajes generados en los dedos índice y pulgar al manipular piezas con agarre de precisión mostrados en la **ilustración 63**, los valores obtenidos por cada objeto son similares. El sistema genera una carga de prensado entre los dedos de 26 hasta 32g para sostener las diferentes piezas ensayadas.

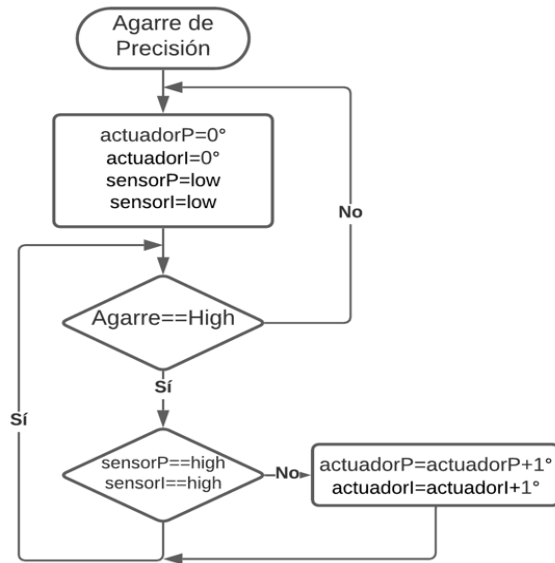


Ilustración 65: Diagrama de flujo agarre de precisión.

En la **ilustración 65** se puede observar el diagrama de flujo del agarre de precisión. La lógica que presenta el programa de agarre de precisión es de esperar la orden del operario en ejecutar el correspondiente agarre, al efectuar la orden los actuadores cierran un grado los dedos índice y pulgar después el sistema valida si se ha detectado un objeto en los sensores táctiles, en el caso de que no, los actuadores vuelven a cerrar un grado más los dedos hasta que se detecte una pieza en ambos sensores táctiles. En el caso de que los sensores no detecten un objeto los actuadores deben cerrar completamente los dedos hasta que las yemas de ambos dedos se junten, por ende, los sensores obligatoriamente se deben detectar entre sí, generando un final de carrera en el sistema. En la **ilustración 66** se puede observar la secuencia del agarre de precisión.

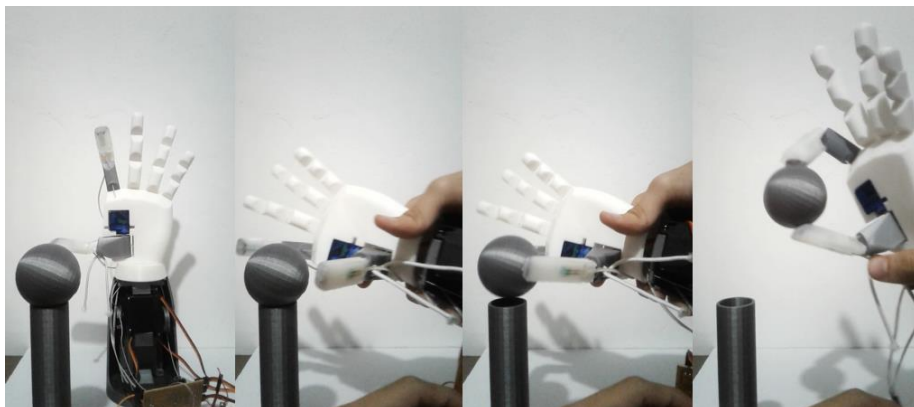


Ilustración 66: Secuencia agarre de precisión de una esfera.

La mano robótica cierra los dedos de forma uniforme hasta presenciar un objeto, los sensores táctiles permiten adaptasen a la geometría de la pieza para generar una fuerza suficiente para sostener un objeto.

6.3. SENSOR TÁCTIL MATRICIAL

Se seleccionaron diferentes objetos para realizar las pruebas de detección y localización en el sensor táctil matricial. Por medio de un software se realiza el mapeo en tres dimensiones de la ubicación e intensidad de la carga sometida entre un objeto y la superficie del sensor. El programa expresa el eje X y Y por medio de recuadros alineados en forma de matriz 4x4, generando la localización del objeto en una gráfica de dos dimensiones. El eje Z representa la intensidad de la presión que ejerce los objetos en contacto con el sensor, expresados por medio de colores, siendo el rojo el más intenso, el amarillo intensidad media y la verde intensidad nula.

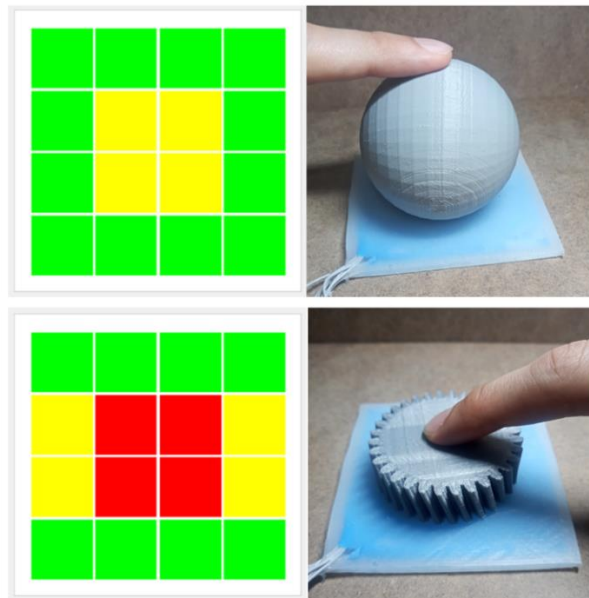


Ilustración 67: Mapeo de una esfera y un engranaje en la matriz sensorial.

En la **ilustración 67** se visualiza el mapeo de una esfera y un engranaje con el sensor táctil matricial, se evidencia que la superficie de contacto entre la esfera y el sensor es mínima en comparación al área del engranaje, se puede rectificar por los resultados obtenidos en la interfaz gráfica, observando la intensidad de carga generada en ambas piezas.

La esfera realiza el estrés mecánico en una pequeña área del centro de la superficie del sensor, por motivos de geometría y ubicación de los puntos de intersección, el punto a detectar de la esfera no se encuentra en la trayectoria de las láminas de

cobre del sensor, por ende, la carga ejercida se distribuye a las intersecciones más cercanas, pero con menor intensidad.

El engranaje presenta una mayor intensidad de carga en el centro de la matriz y una intensidad media en la parte lateral del sensor, debido a que la fuerza ejercida en la superficie del objeto se concentra en el centro del sensor y se distribuye a las partes laterales del sensor con menor intensidad. Si se disminuye o aumenta la presión ejercida en la superficie del sensor la gráfica de mapeo cambiaría.

Los ensayos ejecutados anteriormente se realizaron ejerciendo una presión con los dedos de una mano real, simulando el proceso de agarre de un objeto por medio de una mano robótica aferrándolo entre los dedos y la palma de la mano. También se ejecutaron mapeos de objetos cotidianos solo ejerciendo presión con su propio peso, en la **ilustración 68** se puede observar los resultados obtenidos.

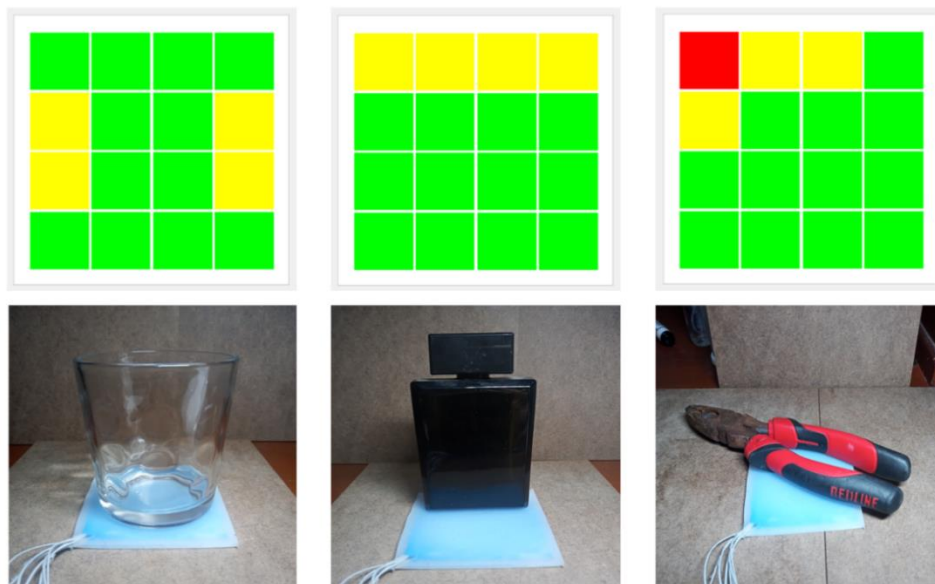


Ilustración 68: Mapeo de diferentes objetos cotidianos en el sensor matricial.

En la **ilustración 68** se puede evidenciar el mapeo de objetos sin ejercer presión adicional en la superficie, detectando y ubicando los objetos solo con la fuerza ejercida por su propio peso. Se evidencia que el vaso de vidrio ha detectado cuatro coordenadas en la matriz 4x4, es debido a la geometría cóncava que presenta la base del objeto, ejerciendo la presión solo en las ubicaciones mencionada con una intensidad media. En el mapeo del perfume se evidencia que el objeto se detectó en la primera fila del sensor táctil con una intensidad media. El alicate presenta una intensidad alta en la parte superior izquierda del sensor táctil, debido a que en el punto reposa el centroide del objeto, evidenciando una carga alta en esa ubicación.

En el mapeo de los tres objetos mencionados anteriormente se determina que el alicate tiene mayor peso que los demás objetos detectados, por la intensidad de colores presentado en los ensayos. La definición de la intensidad de la carga se realiza por medio de programación, se realizan ensayos de presión en la superficie y se modifica la sensibilidad hasta encontrar un valor ideal y definir las zonas de intensidad. La matriz sensorial se calibra cada punto individualmente, en este caso las zonas de intensidad están definidas de la siguiente forma: intensidad media esta entre una tensión en la señal de salida de 1,5V hasta 3V, las tensiones mayores a 3V se consideran de alta intensidad.

Zona de Intensidad	Voltaje	Carga
Nula	0V - 1,49V	0 - 99g
Media	1,5V - 2,99V	100g - 299g
Alta	3,0V – 5,0V	300g - 1000g

Tabla 22: Definición de zonas de intensidad del sensor matricial.

Se aplicaron pruebas con un objeto cilíndrico, ubicando el objeto en diferentes posiciones para analizar los resultados mostrados por la interfaz gráfica. A continuación, se muestra las pruebas realizadas:

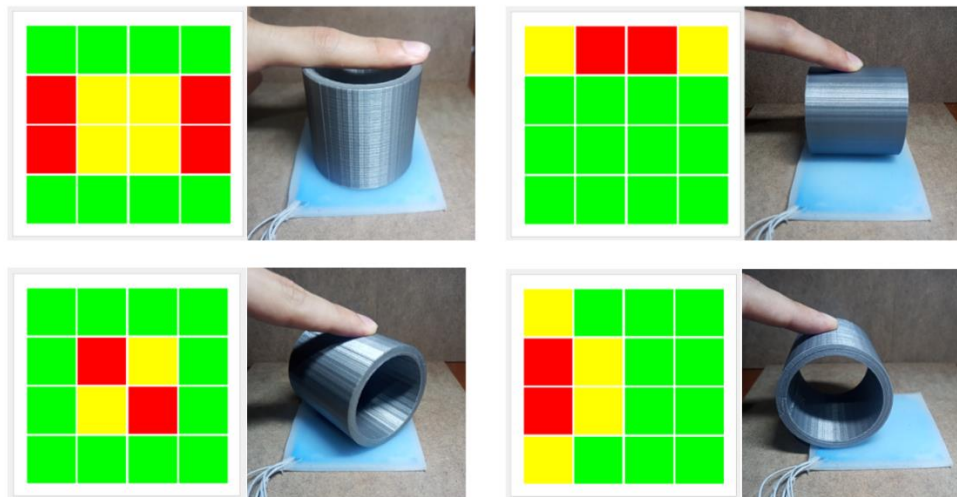


Ilustración 69: Mapeo de un cilindro en diferentes posiciones.

En la **ilustración 69** se puede evidenciar la detección y localización de un cilindro alterando su ubicación y área de contacto en la superficie del sensor táctil. El cilindro

ubicado de forma vertical genera un efecto similar al del vaso de vidrio mencionado anteriormente por el área de contacto del objeto, por ende, las cargas se presentan en los extremos y se distribuyen al centro de la superficie del sensor. Los cilindros ubicados horizontalmente se reduce el área de contacto entre la superficie del sensor y el objeto, de modo que la geometría del mapeo cambia en los cilindros ubicados de forma vertical, horizontal y diagonal con respecto al eje X y Y.

La matriz sensorial presenta aplicabilidad en la detección de objetos de una mano o prótesis robótica, generando una piel artificial sensible a la presión que puede ser ubicada en cualquier parte de la mano, preferiblemente en la palma. Se pueden realizar sensores matriciales más complejos, obteniendo imágenes más detallada de la geometría de un objeto. Al ampliar el tamaño de la matriz se aumentará la resolución del sensor en el mapeo de piezas.

6.4. COMPARACIÓN DE PROTOTIPOS

Al realizar las pruebas de funcionamiento de los diferentes prototipos propuestos de sensores táctiles para una mano robótica, se procedió a realizar comparaciones calificando de 1 a 5, siendo 5 la puntuación más alta y 1 la más baja sobre una característica en particular. En la **tabla 23** se puede observar la comparación correspondiente.

Característica	Prototipo 1	Prototipo 2
Costo	4	2
Precisión	3	4
Accesibilidad	4	4
Versatilidad	2	3
Tamaño	3	4
Total	16	17

Tabla 23: Comparación de prototipos.

El prototipo 2 presenta baja puntuación en costo debido a que los sensores FSR basadas en este prototipo son costosas y al implementarlos en cada dedo de una mano robótica se multiplica el precio. El prototipo 1 a base de espuma conductiva es económico a causa de que el material se vende en grandes proporciones permitiendo realizar múltiples sensores a un bajo costo.

La precisión y versatilidad es mayor en el prototipo 2 que en el prototipo 1, debido a que la espuma conductiva presenta inestabilidad en el transcurso del tiempo y uso del material, presentando baja precisión y dificultando el desarrollo de sistemas sensoriales con base a este material piezorresistivo.

El tamaño de los sensores de fuerza resistivos FSR permite realizar prototipos más pequeños por su delgada lamina, en cambio la espuma presenta un grosor mucho mayor y necesita una mayor deformación en sus dimensiones para generar el efecto piezorresistivo.

Se realizo una comparación entre los tres materiales piezorresistivos trabajados anteriormente en la **tabla 24** se puede observar la comparación realizada.

Característica	Espuma Conductiva	Sensor FSR	Velostat
Costo	5	2	4
Precisión	2	4	3
Accesibilidad	4	4	2
Versatilidad	2	3	3
Tamaño	2	3	4
Total	15	16	16

Tabla 24: Comparación materiales piezorresistivos.

Con los diferentes materiales sensibles a la fuerza mencionados anteriormente se pueden realizar sistemas sensoriales para una mano robótica, ya sea en la yema de los dedos o en la palma de la mano, dependiendo del material utilizado las variables de costo, precisión accesibilidad, versatilidad y tamaño cambian. Se priorizarán características con respecto a otras dependiendo de los parámetros de diseño.

El prototipo 2 permite realiza sensores más precisos, pero con un mayor costo, en cambio el prototipo 1 se pueden realizar sensores táctiles mucho más económicos, pero sacrificando precisión en la detección de objetos.

7. CONCLUSIONES

En el transcurso del desarrollo de los sensores táctiles se expuso los diferentes materiales necesarios para la fabricación de un sistema sensorial para una prótesis o mano robótica, implementando técnicas de adquisición, acondicionamiento y filtrado de la señal, procesadas desde un microcontrolador y analizadas desde un software ejecutado desde un sistema operativo. Se diseñaron dos prototipos de sensores táctiles con materiales y técnicas diferentes que permitieron efectuar pruebas de detección de objetos por medio de agarres de precisión y de potencia, obteniendo resultados favorables respecto al sistema sensorial ubicados en la yema de los dedos de una mano robótica y una piel artificial para una palma de la mano.

Se diseñaron sensores táctiles con espuma conductiva, instalando un mecanismo de activación del sensor en forma de bisagra en la última falange de los dedos de una mano robótica, se aplicaron agarres de precisión y de potencia en la detección y de piezas, obteniendo una confiabilidad del 85% en ambos agarres, por cada 20 objetos a detectar, 17 fueron detectados por los sensores táctiles con espuma conductiva, presentando un error del 15%. El circuito de acondicionamiento de la señal permite amplificar la tensión de salida y modificar la sensibilidad del sensor al detectar un objeto, además es una etapa donde se presenta la calibración del sistema sensorial. Al instalar la espuma conductiva en el mecanismo de activación de los sensores táctiles se debe realizar antes una etapa de desgaste del material llevándolo a la fase de estabilización de su resistividad.

Se fabricó un sensor táctil con sensores de fuerza resistivos FSR comerciales modificando las falanges distales de una mano robótica, efectuando agarres de precisión sosteniendo objetos con dimensiones menores a 60mm entre el dedo pulgar e índice, presentando un 90% de confiabilidad en el prensado de la pieza, por cada 20 objetos a detectar, 18 fueron detectados por el sistema sensorial generando un error de 10%. La silicona líquida elastómera permite moldear la estructura del sensor dándole propiedades mecánicas similares a la piel humana, añadiéndole agarre y flexibilidad en las falanges en el prensado de objetos, además permite generar mejor distribución de las cargas del objeto en toda la superficie.

Se realizó una piel artificial sensorial con un material piezorresistivo llamado Velostat, permitiendo hacer sensores delgados y ligeros para ser instalarlos en la palma de una prótesis o mano robótica, generando imágenes de mapeo en la detección, localización e intensidad de carga de un objeto por medio de una interfaz gráfica. La confiabilidad del sistema táctil es del 95%, por cada 20 pruebas realizadas 19 objetos fueron mapeados, obteniendo un error en los ensayos del 5%. La técnica de adquisición de señal por medio de multiplexación permite procesar gran cantidad de datos disminuyendo la cantidad de puertos necesarios para la conmutación y lectura del sensor mediante un microcontrolador.

La implementación del sentido del tacto en una prótesis o mano robótica, es muy importante para la detección de objetos por parte de una persona amputada o un algoritmo controlando un humanoide, en ambos casos permite generar un sistema de control de los actuadores en la ejecución de los diferentes agarres, adaptándose a la geometría de la pieza que se desea aferrar, efectuando la fuerza necesaria para sostener y prensar un objeto. Los diferentes procesos de diseño de un sensor táctil presentados en el trabajo permiten aplicarlo en cualquier prótesis o mano robótica que se desea trabajar, modificando y rediseñando la estructura para la instalación de los sensores ya sea en la yema de los dedos o en la palma de la mano. Se debe seleccionar los materiales aislantes, conductores y piezorresistivos necesario para la fabricación del sensor, además seleccionar las configuraciones adecuadas de las etapas de adquisición, acondicionamiento y filtrado de la señal, cumpliendo los parámetros de diseño que se han establecido, con la finalidad de realizar el diseño e implementación de un sistema de sensado táctil para una prótesis o mano robótica.

8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para posteriores trabajos en base a sensores táctiles para prótesis o manos robóticas se recomienda seleccionar los materiales y técnicas teniendo en cuenta parámetros de sensibilidad, tamaño y costo. La sensibilidad permite al sistema detectar objetos con mayor precisión. El tamaño del sensor está ligado a la estética y ergonomía de una mano robótica, entre menor sea la dimensión más fácil es su instalación en un prototipo. La disminución del costo en la fabricación de sistemas táctiles permite la asequibilidad de prótesis de mano para una persona carente de su extremidad, implementada en esta tecnología.

Se propone diseñar e implementar sensores más pequeños y precisos en todas las falanges de los dedos de la mano, generando mayor área de sensado en la detección de objetos. Se plantea realizar matrices sensoriales con mayor resolución, aumentando la cantidad de coordenadas detectables para la palma de una mano robótica, generando un sistema más robusto e inteligente, además proponer técnicas en el desarrollar de sensores más pequeños y económicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Antfolk, C., Björkman, A., Frank, S., Sebelius, F., Lundborg, G., & Rosen, B. Sensory feedback from a prosthetic hand based on air-mediated pressure from the hand to the forearm skin. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 44(8), 702–707. [En línea] 2012. [Citado el: 24 de 03 de 2020.] <https://www.medicaljournals.se/jrm/content/html/10.2340/16501977-1001>.
2. López Lahoz, Andrés. Sensores táctiles para aplicaciones robóticas de manipulación. [En línea] [Citado el: 24 de 03 de 2021.] <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/69022/L%C3%93PEZ%20-%20Sensores%20t%C3%A1ctiles%20para%20aplicaciones%20rob%C3%B3ticas%20de%20manipulaci%C3%B3n.pdf?sequence=2>.
3. Ali Zolfagharian, Akif Kaynak, Abbas Kouzani. Closed-loop 4D-printed soft robots. [En línea] 2019. [Citado el: 16 de 08 de 2020.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519308494#!>.
4. Devaraj, H., Schober, R., Picard, M., Teo, M. Y., Lo, C.-Y., Gan, W. C., & Aw, K. C. Highly elastic and flexible multi-layered carbon black/elastomer composite based capacitive sensor arrays for soft robotics. *Measurement: Sensors*, 2-4. [En línea] 2019. [Citado el: 16 de 08 de 2020.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665917420300015>.
5. Lee, Y., Song, W. J., & Sun, J.-Y. Hydrogel soft robotics. *Materials Today Physics*. [En línea] 2019. [Citado el: 16 de 08 de 2020.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542529320300821?via%3Dihub>.
6. Nguyen, N. T., Sarwar, M. S., Preston, C., Goff, A. L., Plesse, C., Vidal, F., Madden, J. D. W. Transparent stretchable capacitive touch sensor grid using ionic liquid electrodes. *Extreme Mechanics Letters*, 100574. [En línea] 2019. [Citado el: 22 de 03 de 2021.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352431619302421?via%3Dihub>.
7. Blanes Campos, Carlos. Garras con Sensores Táctiles Intrínsecos para Manipular Alimentos con Robots. [En línea] 2016. [Citado el: 24 de 03 de 2021.] <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68481/Blanes%20-%20Garras%20con%20sensores%20t%C3%A1ctiles%20intr%C3%ADnsecos%20para%20manipular%20alimentos%20con%20robots.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
8. Shirafuji, S., & Ota, J. Development of a robotic finger with a branching tendon mechanism and sensing based on the moment-equivalent point. *Robotics and Autonomous Systems*, 103538. [En línea] 2020. [Citado el: 22 de 03 de 2021.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921889019302908?via%3Dihub>.
9. Youssefi, S., Denei, S., Mastrogiovanni, F., & Cannata, G. Skinware 2.0: A real-time middleware for robot skin. *SoftwareX*, 3-4, 6–12. [En línea] 2015. [Citado el: 16 de 08 de 2020.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711015000102#f000005>.
10. Maniscalco, U., Messina, A., & Storniolo, P. ASS4HR — An Artificial Somatosensory System for a Humanoid Robot. The ROS package. *SoftwareX*, 11, 100501. [En línea]

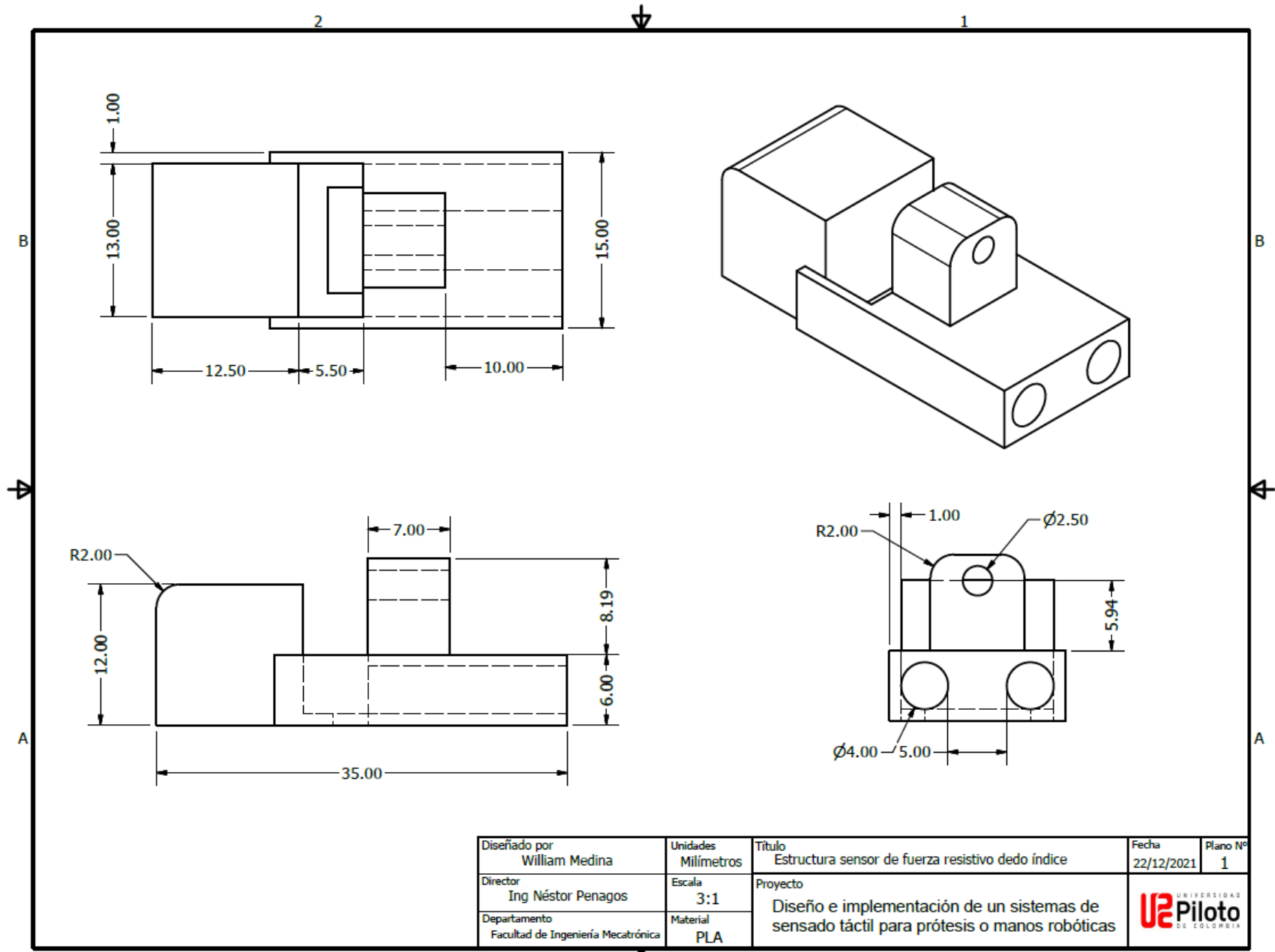
2019. [Citado el: 16 de 08 de 2020.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711019300536?via%3Dihub>.
11. Mazzei, D., De Maria, C., & Vozzi, G. Touch sensor for social robots and interactive objects affective interaction. *Sensors and Actuators A: Physical*, 251, 92–99. [En línea] 2016. [Citado el: 22 de 03 de 2021.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424716306331?via%3Dihub>.
 12. Gandarias, J. Gómez, J. García, A. Clasificación de información táctil para la detección de personas. [En línea] [Citado el: 24 de 03 de 2021.] https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/46860/ActasJA2017_JGandariasetal.pdf?sequence=2.
 13. Gelsight, GelSight Mobile. [En línea] [Citado el: 24 de 03 de 2021.] <https://gelsight.com/>.
 14. Grossrc, Humanoid Robotic Hand. [En línea] 2017. [Citado el: 20 de 03 de 2019.] <https://www.thingiverse.com/thing:2269115>.
 15. M. Cutkosky. On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Task. [En línea] 1989. [Citado el: 17 de 03 de 2022.] https://www.researchgate.net/publication/3298011_On_grasp_choice_grasp_models_and_the_design_of_hands_for_manufacturing_tasks.
 16. Farnell. high density conductive foam. [En línea] 2011. [Citado el: 15 de 04 de 2021.] <http://www.farnell.com/datasheets/1485190.pdf>.
 17. Interlink electronics, FSR X™ 400 Series | Force Sensing from 0.3 N to 50 N. [En línea] [Citado el: 15 de 04 de 2021.] <https://www.interlinkelectronics.com/fsr-x-400>.
 18. Pololu Robotics y Electronics, A-Star 32U4 Micro. [En línea] [Citado el: 10 de 04 de 2021.] <https://www.pololu.com/product/3101>.
 19. Creus Solé, A. Instrumentos industriales, su ajuste y calibración. [En línea] 2016. [Citado el: 20 de 12 de 2021.] https://www.academia.edu/15404340/Instrumentos_industriales_su_ajuste_y_calibracion.
 20. Quintero Camacho, R. Método para linealizar la salida de un sensor. *Ingeniería*. Vol. 8, Nº. 1. 82-85,. [En línea] 2003. [Citado el: 22 de 12 de 2021.] <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4797297>.
 21. Smooth on, Dragon skin FX-Pro. [En línea] [Citado el: 10 de 04 de 2021.] <https://www.smooth-on.com/products/dragon-skin-fx-pro/>.
 22. Adafruit, Pressure-Sensitive Conductive Sheet (Velostat/Linqstat). [En línea] [Citado el: 24 de 03 de 2021.] <https://www.adafruit.com/product/1361#technical-details>.
 23. Onsemi, Single Supply Dual Operational Amplifiers Datasheet,. [En línea] [Citado el: 20 de 12 de 2021.] <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm358-d.pdf>.
 24. Eolas prints, Ficha técnica PLA. [En línea] [Citado el: 10 de 04 de 2021.] <https://www.boloberry.com/wp-content/uploads/2019/01/Ficha-t%C3%A9cnica-PLA.pdf>.


25. Lynch, K. M., Marchuk, N., & Elwin, M. L. Digital Signal Processing. Embedded Computing and Mechatronics with the PIC32, 341–374,. [En línea] 2016. [Citado el: 20 de 11 de 2021.] Lynch, K. M., Marchuk, N., & Elwin, M. L. (2016). Digital Signal Processing. Emb<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124201651000226>.
26. Microchip, ATmega168PA datasheet. [En línea] [Citado el: 10 de 04 de 2021.] <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega168PA#datasheet-toggle>.
27. Quinayas Cesar, Diseño y construcción de una prótesis robótica de mano funcional adaptada a varios agarres. [En línea] [Citado el: 12 de 05 de 2019.] <http://www.unicauca.edu.co/deic/Documentos/Tesis%20Quinay%E1s.pdf>.
28. Smith, S. W. Moving Average Filters. Digital Signal Processing, 277–284,. [En línea] 2003. [Citado el: 20 de 11 de 2021.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750674447500522>.
29. InMoov. Hand and Forarm. [En línea] [Citado el: 12 de 05 de 2020.] inmoov.fr/hand-and-forarm/.
30. Kyung, Yun. Compliant Prosthetic Hand With Sensorimotor Control and Sensory Feedback for Upper Limb Amputees,. [En línea] 2016. [Citado el: 10 de 05 de 2020.] Kyung, Yun. Compliant Prosthetic Hand With Sensorimotor Control and Sensory Feedback for Upper Limb Amputees,. [En línea] 2016. [Citado el: 10 de 05 de 2020.] <https://www.instructables.com/Compliant-Prosthetic-Hand-With-Sensorimotor-Control/>.
31. Mayné, Jordi. Sensores acondicionadores y procesadores de señal,. [En línea] [Citado el: 10 de 04 de 2021.] http://arantxa.ii.uam.es/~gdrivera/robotica/h_datos/Sensores_Acond.pdf.
32. Interlink electronics, FSR Force Sensing Resistors,. [En línea] [Citado el: 20 de 12 de 2021.] <https://www.generationrobots.com/media/FSR400-Series-Integration-Guide.pdf>.

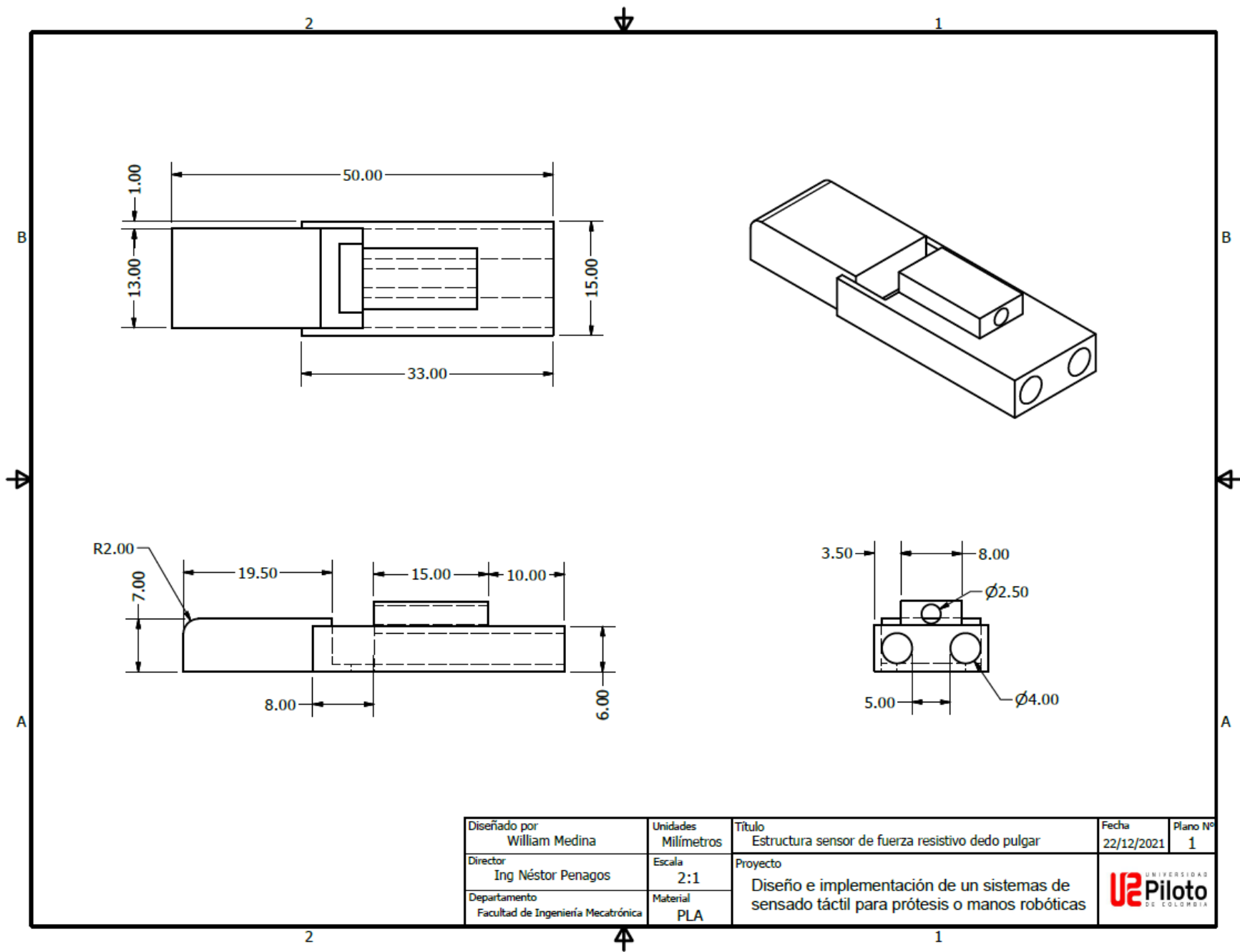
ANEXO 1. PLANOS MECÁNICOS


PROYECTO PG-20-1-04

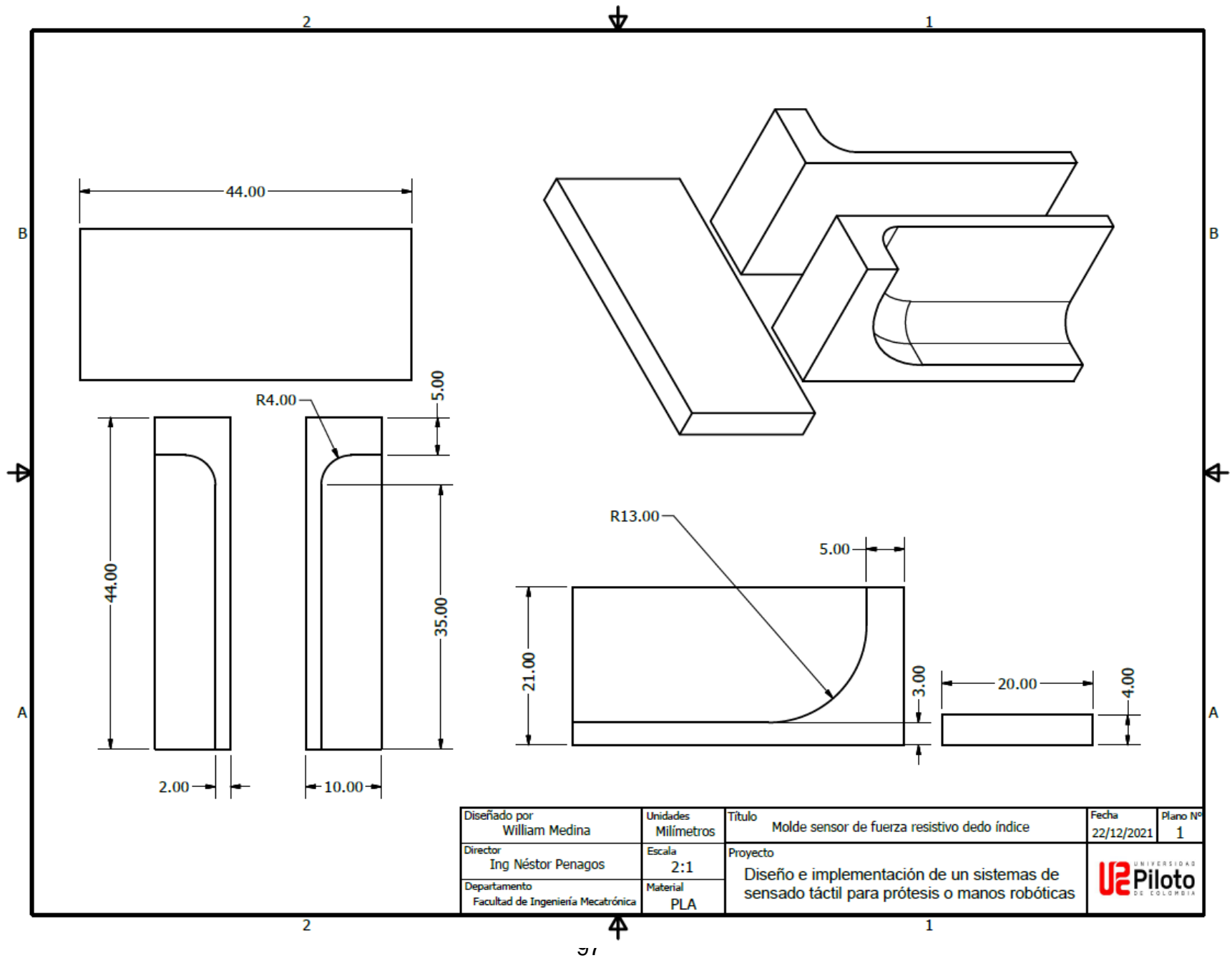
**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SENSADO TÁCTIL PARA
PRÓTESIS O MANOS ROBÓTICAS**




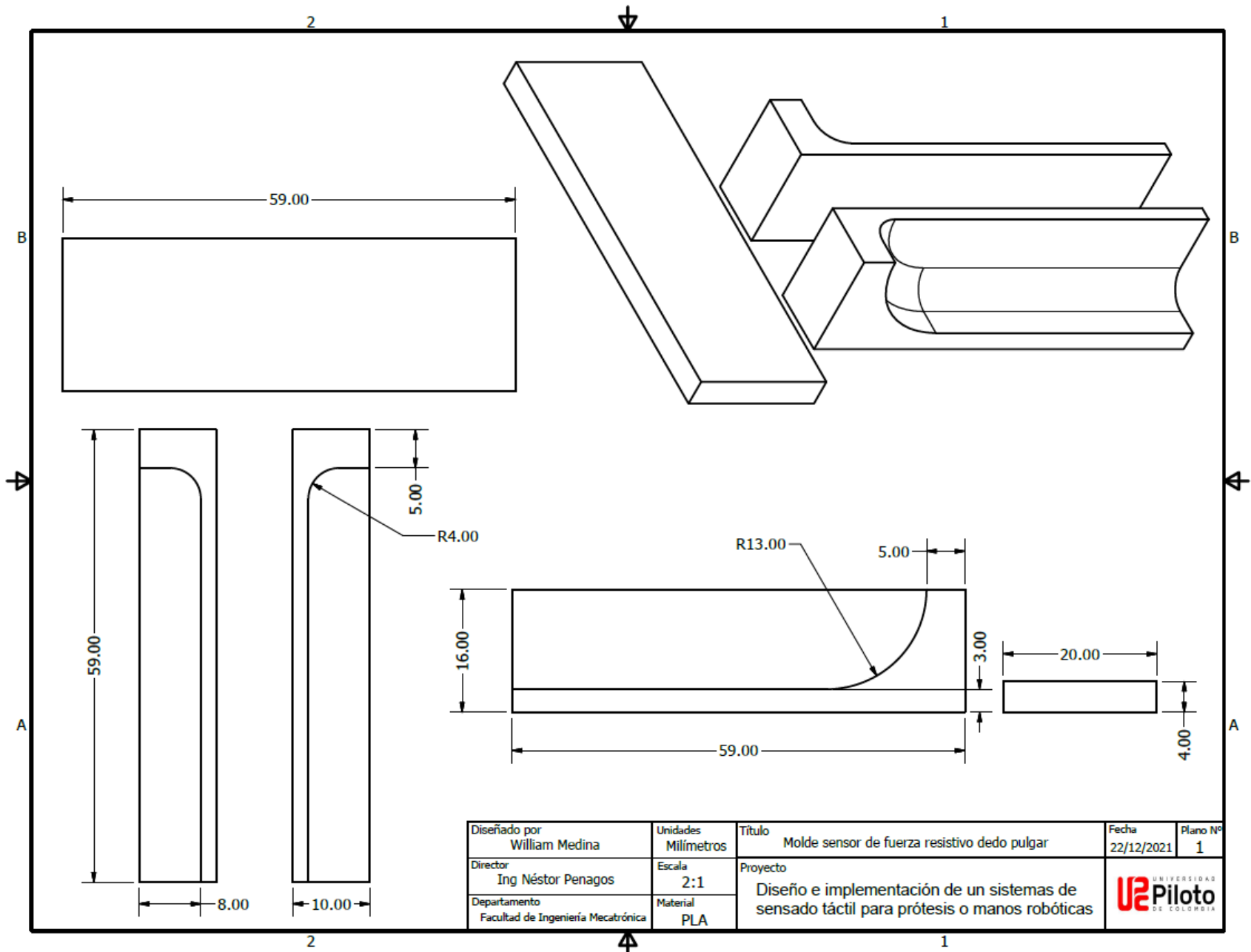
Diseñado por William Medina	Unidades Milímetros	Título Estructura sensor de fuerza resistivo dedo índice	Fecha 22/12/2021	Plano Nº 1
Director Ing Néstor Penagos	Escala 3:1	Proyecto Diseño e implementación de un sistemas de sensado táctil para prótesis o manos robóticas		
Departamento Facultad de Ingeniería Mecatrónica	Material PLA			

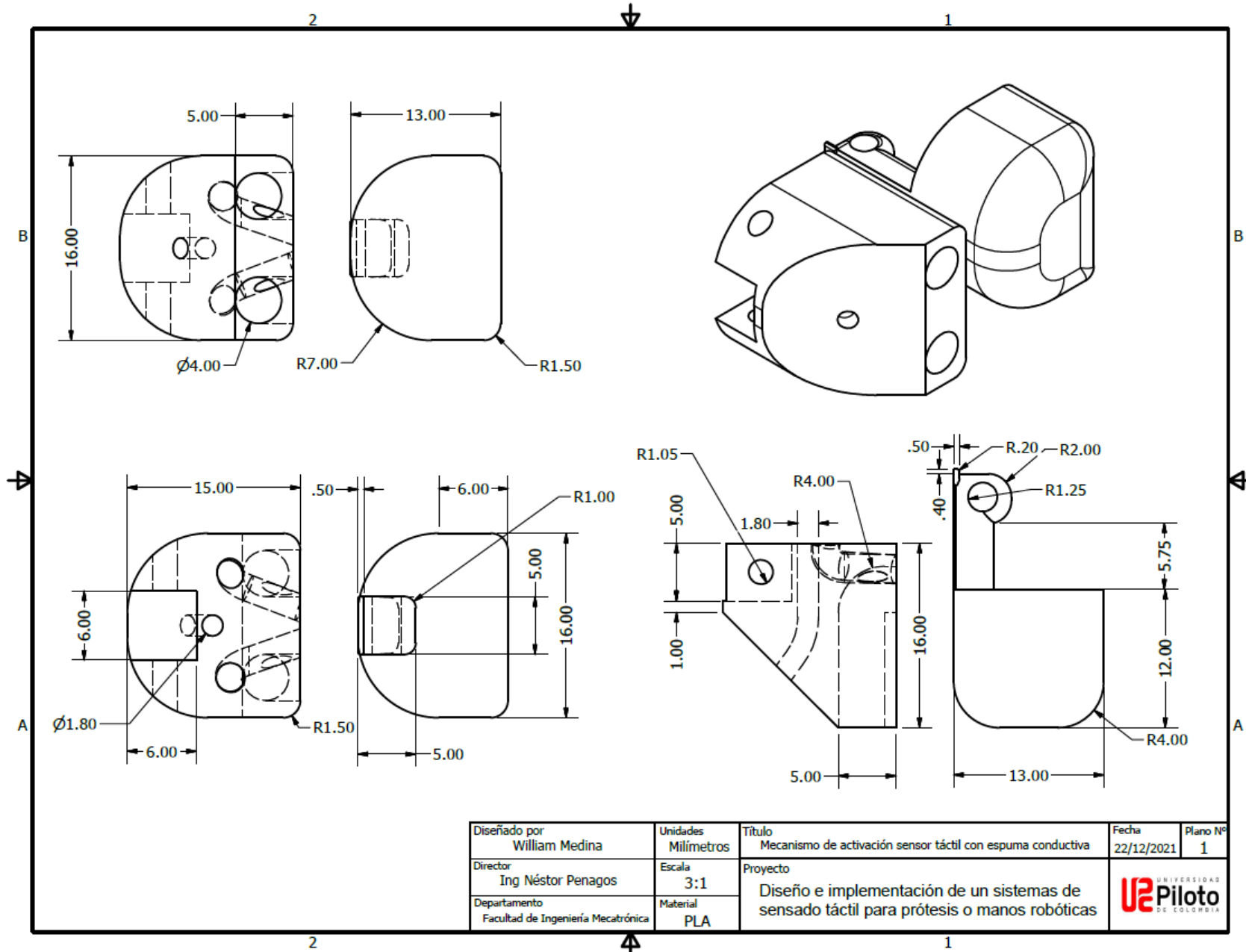



Diseñado por William Medina	Unidades Milímetros	Título Estructura sensor de fuerza resistivo dedo pulgar	Fecha 22/12/2021	Plano N° 1
Director Ing Néstor Penagos	Escala 2:1	Proyecto Diseño e implementación de un sistemas de sensado táctil para prótesis o manos robóticas		
Departamento Facultad de Ingeniería Mecatrónica	Material PLA			

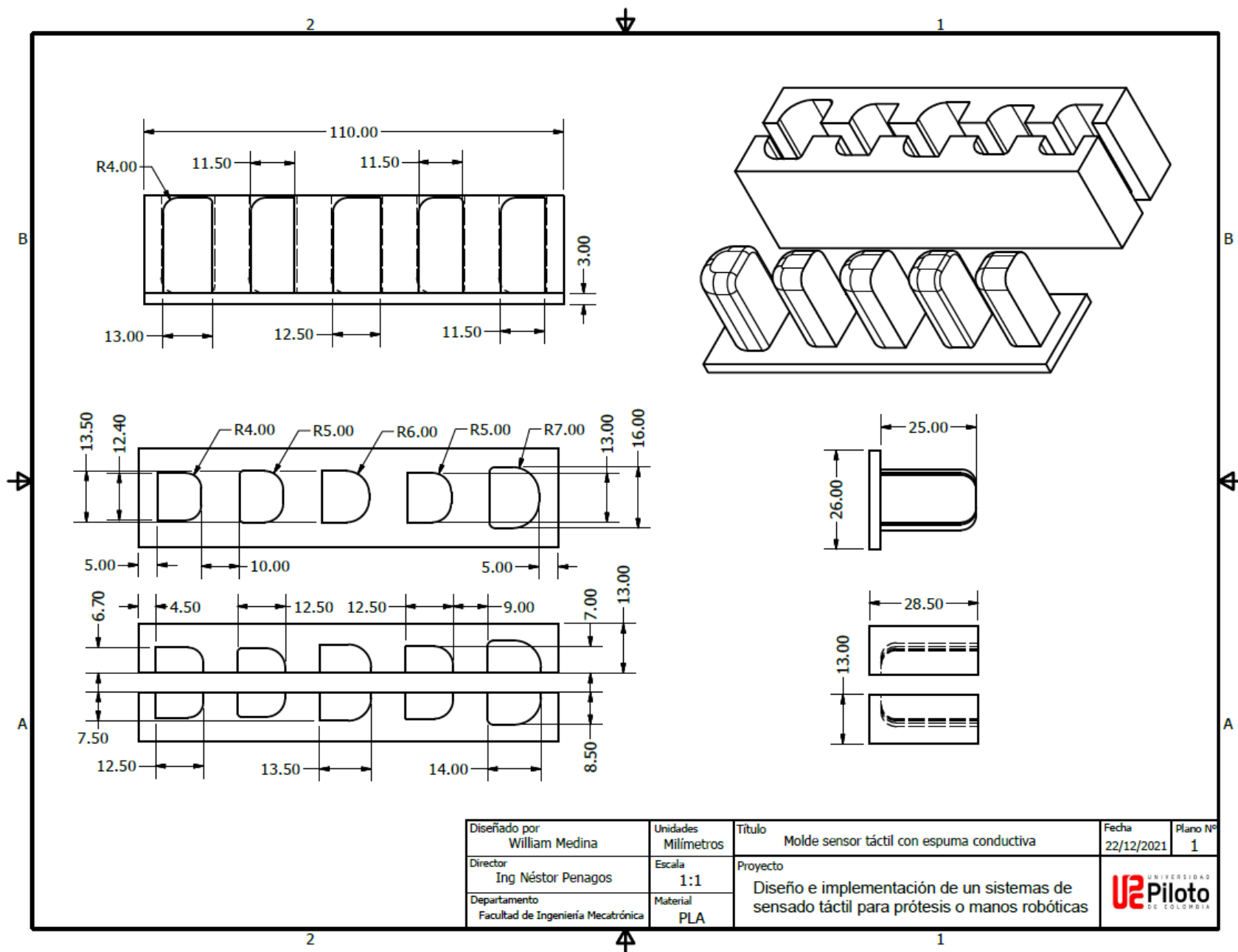



Diseñado por William Medina	Unidades Milímetros	Título Molde sensor de fuerza resistivo dedo índice	Fecha 22/12/2021	Plano Nº 1
Director Ing Néstor Penagos	Escala 2:1	Proyecto Diseño e implementación de un sistemas de sensado táctil para prótesis o manos robóticas		
Departamento Facultad de Ingeniería Mecatrónica	Material PLA			

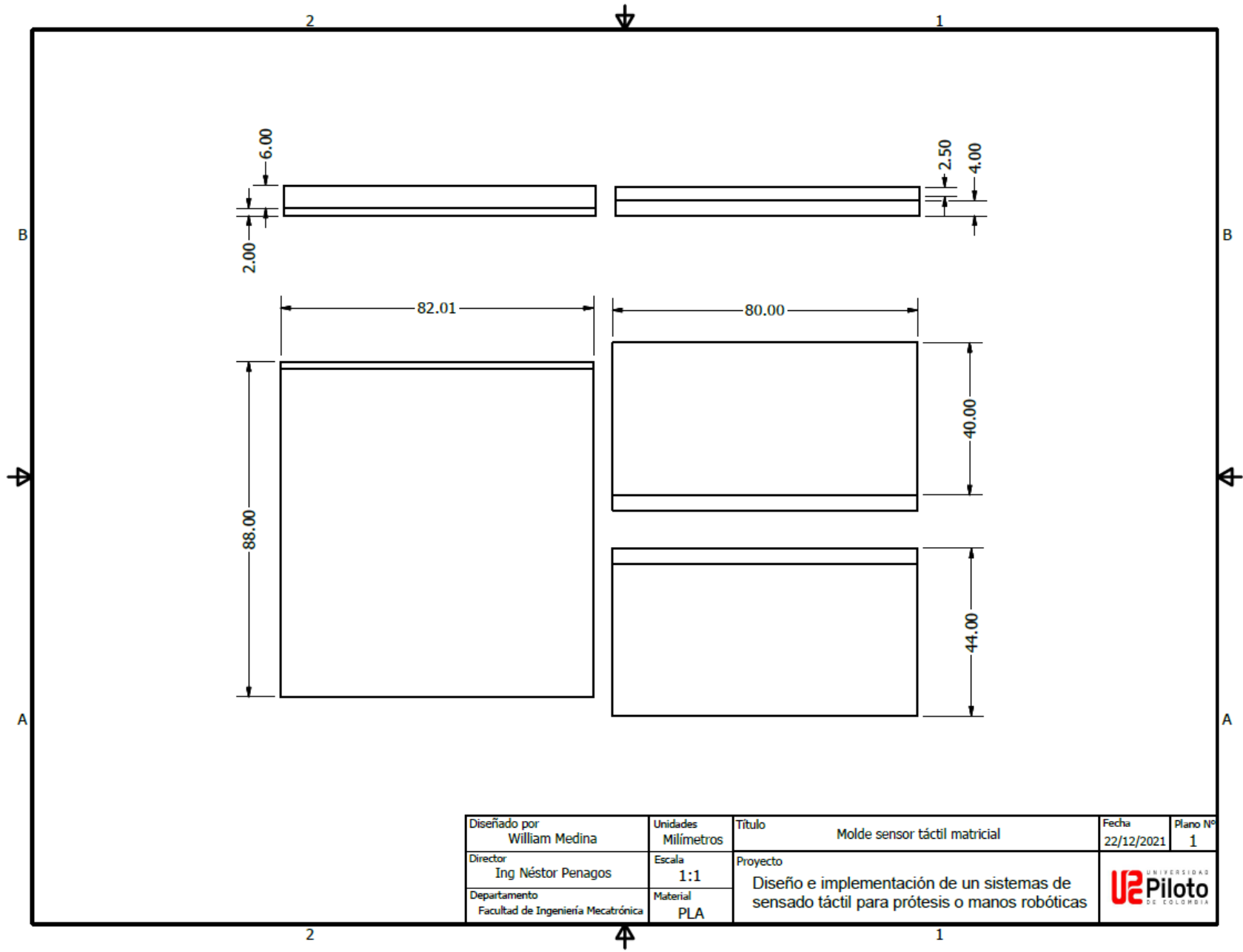




Diseñado por William Medina	Unidades Milímetros	Título Mecanismo de activación sensor táctil con espuma conductiva	Fecha 22/12/2021	Plano Nº 1
Director Ing Néstor Penagos	Escala 3:1	Proyecto Diseño e implementación de un sistemas de sensado táctil para prótesis o manos robóticas		
Departamento Facultad de Ingeniería Mecatrónica	Material PLA			



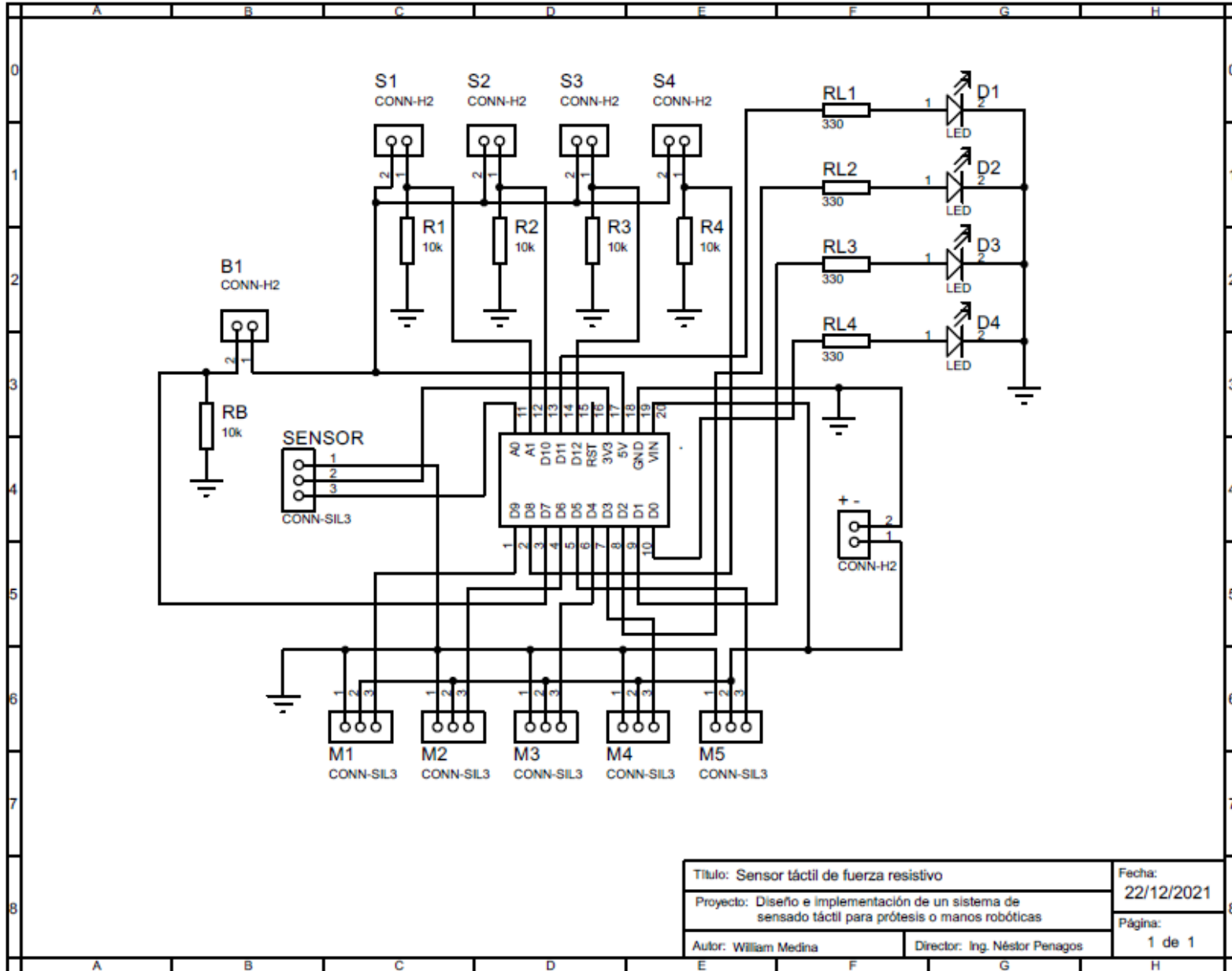
Diseñado por William Medina	Unidades Milímetros	Título Molde sensor táctil con espuma conductiva	Fecha 22/12/2021	Plano Nº 1
Director Ing Néstor Penagos	Escala 1:1	Proyecto Diseño e implementación de un sistemas de sensado táctil para prótesis o manos robóticas		
Departamento Facultad de Ingeniería Mecatrónica	Material PLA			



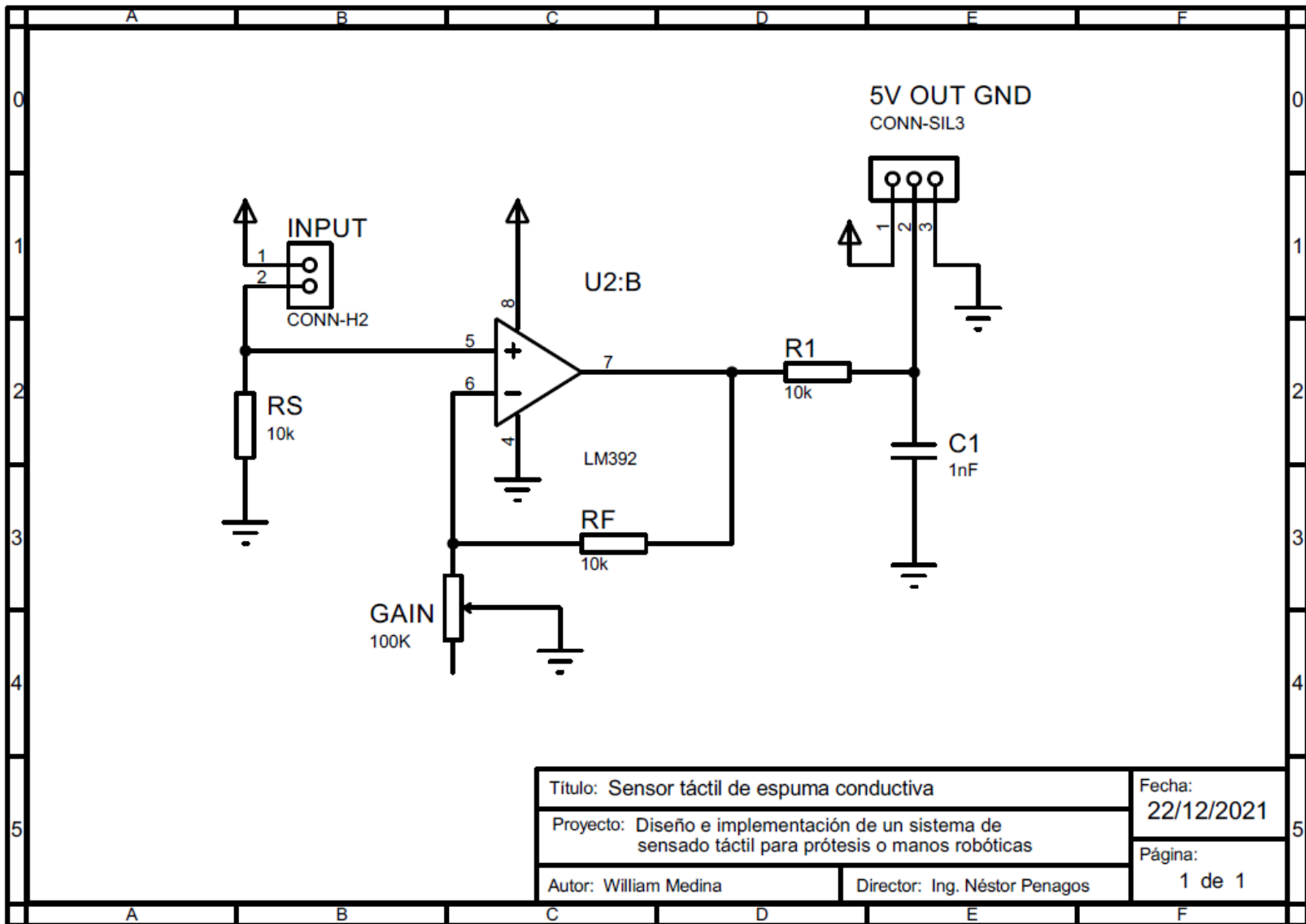
ANEXO 2. PLANOS ELÉCTRICOS

PROYECTO PG-20-1-04

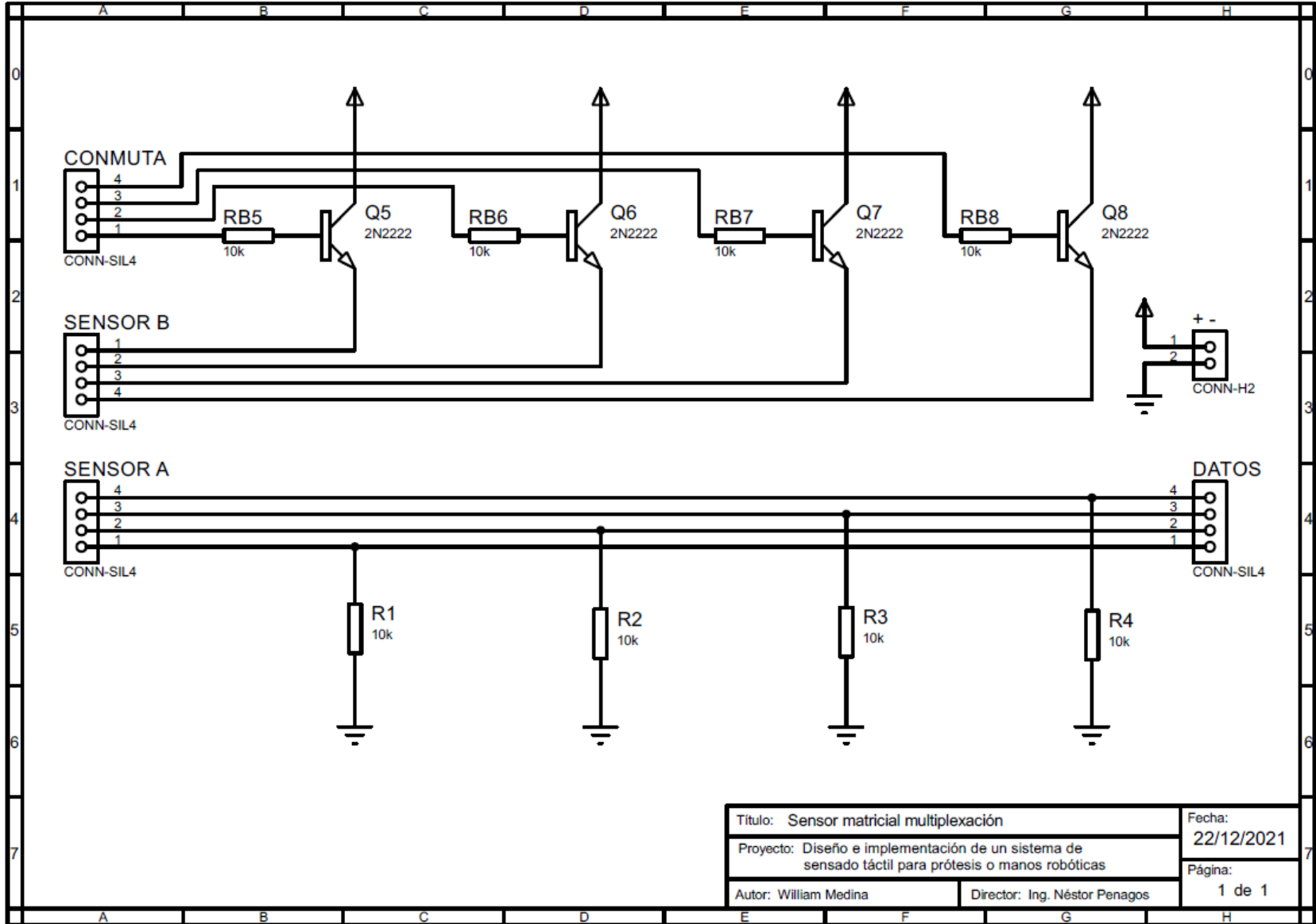
**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SENSADO TÁCTIL PARA
PRÓTESIS O MANOS ROBÓTICAS**



Titulo: Sensor táctil de fuerza resistivo		Fecha: 22/12/2021
Proyecto: Diseño e implementación de un sistema de sensado táctil para prótesis o manos robóticas		Página: 1 de 1
Autor: William Medina	Director: Ing. Néstor Penagos	



Título: Sensor táctil de espuma conductiva		Fecha: 22/12/2021
Proyecto: Diseño e implementación de un sistema de sensado táctil para prótesis o manos robóticas		Página: 1 de 1
Autor: William Medina	Director: Ing. Néstor Penagos	



Título: Sensor matricial multiplexación		Fecha: 22/12/2021
Proyecto: Diseño e implementación de un sistema de sentido táctil para prótesis o manos robóticas		Página: 1 de 1
Autor: William Medina	Director: Ing. Néstor Penagos	

ANEXO 3. ALGORITMOS

PROYECTO PG-20-1-04

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SENSADO TÁCTIL PARA
PRÓTESIS O MANOS ROBÓTICAS**

ALGORITMO AGARRE DE PRECISIÓN Y POTENCIA EN MANO ROBÓTICA

```
#include <Servo.h>
Servo servoP;
Servo servol;
Servo servoM;
Servo servoMe;
Servo servoA;
int boton=8;
int LED=7;
int Muscular = 0;
int PULGAR, INDICE, MEDIO, ANULAR = 0;
int Vpulgar, Vindice, Vmedio, Vanular =0;
void setup() {
    servoM.attach(9);    //M1
    servoP.attach(5);    //M2
    servol.attach(3);    //M3
    servoMe.attach(10); //M4
    servoA.attach(11);   //M5
    servoM.write(0);
    servoP.write(0);
    servol.write(0);
    servoMe.write(0);
    servoA.write(0);
    pinMode(boton,INPUT);
    pinMode(LED,OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
}
void lecturaSensores(){
    int Muscular = analogRead(A6);
    int PULGAR = analogRead(A0);
    int INDICE = analogRead(A1);
    int MEDIO = analogRead(A7);
    int ANULAR = analogRead(A11);
    Serial.print("PULGAR: ");
    Serial.print(PULGAR);
    Serial.print(" ");
    Serial.print("INDICE: ");
    Serial.print(INDICE);
    Serial.print(" ");
    Serial.print("MEDIO: ");
    Serial.print(MEDIO);
    Serial.print(" ");
    Serial.print("ANULAR: ");
    Serial.print(ANULAR);
```

```

Serial.print(" ");
Serial.print("Muscular: ");
Serial.println(Muscular);
}
void loop() {
Muscular = analogRead(A6);
PULGAR = analogRead(A0);
INDICE = analogRead(A1);
MEDIO = analogRead(A7);
ANULAR = analogRead(A11);
int B=digitalRead(boton);
//AGARRE DE PRECISION
if(B==HIGH){
lecturaSensores();
digitalWrite(LED,HIGH);
delay(100);
lecturaSensores();
digitalWrite(LED,LOW);
delay(100);
lecturaSensores();
if(Muscular > 150){
servoM.write(50);
for(int i=0; i<180 ;i++){
PULGAR = analogRead(A0);
INDICE = analogRead(A1);
if(PULGAR > 5 && INDICE > 5){
while(Muscular>100){
servoP.write(i);
servol.write(i);
Muscular = analogRead(A6);
digitalWrite(LED,HIGH);
delay(10);
lecturaSensores();
}
break;
}
servoP.write(i);
servol.write(i);
delay(10);
lecturaSensores();
}
delay(100);
}
else{
servol.write(0);
}
}
}

```

```

servoP.write(0);
delay(150);
servoM.write(0);
lecturaSensores();
}
}
// AGARRE POTENCIA
else{
digitalWrite(LED,HIGH);
if(Muscular > 150){
servoM.write(35);
for(int i=0; i<180 ;i++){
if(Vpulgar==0){
PULGAR = analogRead(A0);
servoP.write(i);
if(PULGAR>150){
Vpulgar=1;
}
}
if(Vindice==0){
INDICE = analogRead(A1);
servoI.write(i);
if(INDICE>150){
Vindice=1;
}
}
if(Vmedio==0){
MEDIO = analogRead(A7);
servoMe.write(i);
if(MEDIO>250){
Vmedio=1;
}
}
if(Vanular==0){
ANULAR = analogRead(A11);
servoA.write(i);
if(ANULAR>150){
Vanular=1;
}
}
}
lecturaSensores();
delay(10);
}
while(Muscular>100){
Muscular = analogRead(A6);

```

```

        delay(10);
        digitalWrite(LED,HIGH);
        lecturaSensores();
    }
    Vpulgara=0;
    Vindice=0;
    Vmedio=0;
    Vanular=0;
    lecturaSensores();
}else{
    servoMe.write(0);
    servoA.write(0);
    delay(100);
    servoP.write(0);
    servol.write(0);
    delay(100);
    servoM.write(0);
    lecturaSensores();
}
}
}
}

```

ALGORITMO MULTIPLEXACIÓN SENSOR TÁCTIL MATRICIAL

```

int Fila1[]={0,0,0,0};
int Fila2[]={0,0,0,0};
int Fila3[]={0,0,0,0};
int Fila4[]={0,0,0,0};
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(8,OUTPUT);
    pinMode(9,OUTPUT);
    pinMode(10,OUTPUT);
    pinMode(11,OUTPUT);
    digitalWrite(8,LOW);
    digitalWrite(9,LOW);
    digitalWrite(10,LOW);
    digitalWrite(11,LOW);
}
void loop() {

```

```

float val1 = analogRead(A0);
float val2 = analogRead(A1);
float val3 = analogRead(A2);
float val4 = analogRead(A3);
for (int i=0; i<4; i++) {
    digitalWrite(8+i,HIGH);
    delay(20);
    float val1 = analogRead(A0);
    float val2 = analogRead(A1);
    float val3 = analogRead(A2);
    float val4 = analogRead(A3);
    digitalWrite(8,LOW);
    digitalWrite(9,LOW);
    digitalWrite(10,LOW);
    digitalWrite(11,LOW);
    Fila1[i]=val1;
    Fila2[i]=val2;
    Fila3[i]=val3;
    Fila4[i]=val4;
}
Serial.print(String(Fila1[0]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila1[1]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila1[2]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila1[3]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila2[0]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila2[1]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila2[2]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila2[3]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila3[0]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila3[1]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila3[2]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila3[3]));
Serial.print(",");
Serial.print(String(Fila4[0]));

```

```
    Serial.print(",");  
    Serial.print(String(Fila4[1]));  
    Serial.print(",");  
    Serial.print(String(Fila4[2]));  
    Serial.print(",");  
    Serial.println(String(Fila4[3]));  
}
```


ANEXO 4. DATA SHEET

PROYECTO PG-20-1-04

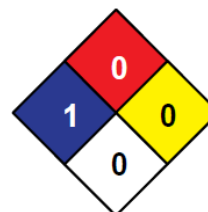
**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SENSADO TÁCTIL PARA
PRÓTESIS O MANOS ROBÓTICAS**

DRAGON SKIN FX-PRO

Propiedades físicas y mecánicas (21)

Appearance:	viscous liquid	Vapor pressure:	None (Polymeric Resin)
Odor:	Mild to sweet odor	Vapor density (Air=1):	>1
pH:	No data	Evaporation rate:	No data
Flash Point:	>300 °F	Solubility in water:	Insoluble
Melting / freezing point:	No data	Specific Gravity (H2O=1, at 4 °C):	1.05 – 1.15
Low / high boiling point:	No data	Relative density:	No data
Upper flammability limits:	No data	Decomposition temperature:	No data
Lower flammability limits:	No data	Viscosity:	5,000 – 50,000 centipoise

HMIS	
H	1
F	0
R	0



NFPA

1. Reactividad

No se producen reacciones peligrosas si se almacena y manipula según lo prescrito / indicado. No tiene efectos corrosivos sobre el metal. No propaga el fuego.

2. Estabilidad química

Estos productos son estables a temperatura ambiente en recipientes cerrados en condiciones normales de almacenamiento y manipulación.

3. Posibilidad de reacciones peligrosas

No se puede producir una polimerización peligrosa

4. Condiciones a evitar

Ninguno conocido

5. Materiales incompatibles

Bases y ácidos fuertes

6. Productos de descomposición peligrosos

La descomposición térmica oxidativa puede producir óxidos de carbono, gases / vapores y trazas de compuestos de carbono quemados de forma incompleta.

ESPUMA CONDUCTIVA 038-0016-MULTICOMP

Datos técnicos (16)

Property:	Test Method:	Requirement:
Foam Type	N/A	Polyether polyurethane foam impregnated with rigid conductive latex
Density (kg/m ³)	BS 4443 Pt1 Method 2	33 - 55
Tensile Strength (KPa)	BS 4443 Pt1 Method 3A	70 minimum
Elongation @ Break (%)	BS 4443 Pt1 Method 3A	N/A
Loss in Tensile Strength After Heat Ageing (%)	BS 4443 Pt1 Method 3A 140°C for 16 hours	30% Max Loss
Loss in Tensile Strength After Humidity Ageing (%)	BS 4443 Pt1 Method 3A 105°C for 3 hours	30% Max Loss
Compression Set (50% Compression)	BS 4443 Pt1 Method 3A	N/A
Volume Resistivity (ohms/m)	BS 2044 Pt1 Method 3 (100V)	250 maximum
Surface Resistivity (K ohms)	Megger BM201 (100V)	<10

Características

- Espuma conductiva de poliuretano impregnada de partículas de carbono.
- No corrosivo.
- Ideal para el amortiguamiento de productos en transporte.

SENSOR DE FUERZA RESISTIVOS FSR402

Ficha técnica (17)

Feature	Condition	Value*	Notes
Actuation Force		0.1 Newtons	
Force Sensitivity Range		0.1 - 10.0 ² Newtons	
Force Repeatability³	(Single part)	± 2%	
Force Resolution³		continuous	
Force Repeatability³	(Part to Part)	±6%	
Non-Actuated Resistance		10M W	
Size		18.28mm diameter	
Thickness Range		0.2 - 1.25 mm	
Stand-Off Resistance		>10M ohms	Unloaded, unbent
Switch Travel	(Typical)	0.05 mm	Depends on design
Hysteresis³		+10%	$(R_{F+} - R_{F-})/R_{F+}$
Device Rise Time		<3 microseconds	measured w/steel ball
Long Term Drift		<5% per log ₁₀ (time)	35 days test, 1kg load
Temp Operating Range	(Recommended)	-30 - +70 °C	
Number of Actuations	(Life time)	10 Million tested	Without failure

- La fuerza máxima de actuación se puede modificar en sensores personalizados.
- El rango de fuerza se puede aumentar en sensores personalizados. Interlink Electronics ha diseñado y fabricado sensores con una fuerza operativa superior a 50 kg.
- La sensibilidad a la fuerza depende de la mecánica y la resolución depende de la electrónica de medición.

VELOSTAT

Detalles técnicos (22)

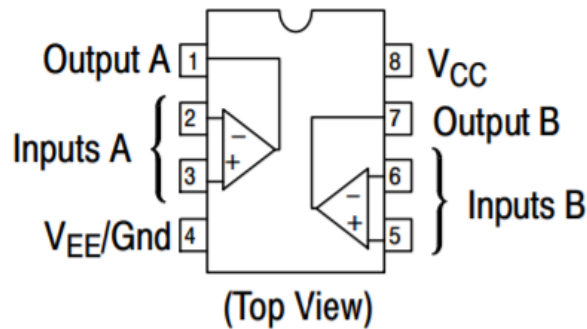
- Dimensiones: 11 "x 11" (280 mm x 280 mm)
- Espesor: 4 mil / 0,1 mm
- Peso: 18,66 g
- Límites de temperatura: -45 ° C a 65 ° C (-50 ° F a 150 ° F)
- Sellable al calor: Sí
- Resistividad de volumen: <500 ohmios-cm
- Resistividad superficial: <31.000 ohmios / cm²



Descripción

Este material conductor (también conocido como "Velostat" o "Linqstat") es sensible a la presión: apretarlo reducirá la resistencia, por lo que es útil para hacer sensores flexibles. ¡Y también es mucho menos costoso que los sensores de presión o de curvatura disponibles en el mercado! Cada pedido viene con una pieza de 11 "x11" (28 cm x 28 cm) de 4 mil (0,1 mm) de grosor. Para eliminar los pliegues duros, simplemente colóquese sobre una mesa y coloque un libro pesado encima para aplanarlo.

AMPLIFICADOR OPERACIONAL LM358M



(23)

MAXIMUM RATINGS ($T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltages Single Supply Split Supplies	V_{CC} V_{CC}, V_{EE}	32 ± 16	Vdc
Input Differential Voltage Range (Note 1)	V_{IDR}	± 32	Vdc
Input Common Mode Voltage Range	V_{ICR}	-0.3 to 32	Vdc
Output Short Circuit Duration	t_{SC}	Continuous	
Junction Temperature	T_J	150	$^\circ\text{C}$
Thermal Resistance, Junction-to-Air (Note 2)	Case 846A Case 751 Case 626	$R_{\theta JA}$ 238 212 161	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	T_A	LM258 LM358, LM358A, LM358E LM2904, LM2904A, LM2904E LM2904V, NCV2904 (Note 3) -25 to +85 0 to +70 -40 to +105 -40 to +125	$^\circ\text{C}$

Características

- Salidas protegidas contra cortocircuitos
- Etapa de entrada diferencial real
- Operación de suministro único: 3.0 V a 32 V
- Corrientes de polarización de entrada bajas
- Compensación interna
- El rango de modo común se extiende a suministro negativo
- Operación de suministro simple y dividido
- Las abrazaderas ESD en las entradas aumentan la robustez del dispositivo sin afectar la operación
- Estos dispositivos son libres de Pb, libres de halógenos / libres de BFR