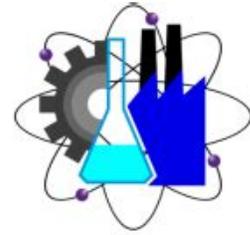




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

Caracterización de un prototipo de un sensor Flex aplicado al reconocimiento de la dactilología en Lengua de Señas Mexicana

Macías Rojas Luis Guillermo

Director: Dr. Outmane Oubram

Co-director: Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar

Tesis presentada para obtener el grado de Licenciado en
ingeniería eléctrica electrónica

28 de Mayo de 2023

Resumen

El desarrollo de sensores flexibles piezoresistivos ha incrementado en la última década, una de sus aplicaciones más habituales es en la adquisición de señales provenientes de guantes electrónicos traductores de Lenguas de Señas. Este trabajo describe la fabricación y el diseño de un prototipo de resistor flexible con materiales de bajo costo basado en *velostat*, así como la caracterización de su señal con respecto al ángulo de flexión. Para la caracterización de su señal se implementó un protocolo de medición de su resistencia eléctrica que utiliza un mecanismo fabricado con tecnología de impresión 3D y que se describe de manera detallada. El objetivo del prototipo pretende tener aplicación en la traducción de señas estáticas de la dactilología en Lengua de Señas Mexicana al español escrito.

Dedicatoria

Para Carlos y Carolina.

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi profundo agradecimiento a mis directores de tesis por su paciencia, orientación y valiosas críticas en el desarrollo de este trabajo de tesis, en especial al Dr. Outmane, quien además de brindarme su apoyo en la redacción de este escrito, ha reconocido el potencial en mi persona y me ha motivado a perseguir una mayor grado académico.

Por otra parte, me gustaría extender mis agradecimientos a mis padres y a mi novia, quienes han proporcionado su apoyo incondicional durante todo el transcurso de mi carrera universitaria.

Mi agradecimiento también se extiende a la Lic. Mireya Jaimes por su asesoramiento en la redacción de este trabajo.

Índice general

Índice de figuras	10
Índice de tablas	11
1. Introducción	12
1.1. Motivación	12
1.2. Problemática	13
1.3. Justificación	14
1.4. Hipótesis	14
1.5. Objetivos	15
1.5.1. Objetivo general	15
1.5.2. Objetivos específicos	15
1.6. Metodología	15
1.6.1. Caracterización del sensor	16
1.6.2. Descripción del proceso de fabricación del sensor	18
1.6.3. Descripción del mecanismo empleado en la caracteri- zación del sensor	18
1.6.4. Selección de algoritmos de procesamiento de la señal	18
1.7. Alcance y limitaciones	19
1.7.1. Alcance	19
1.7.2. Limitaciones	19

2. Marco teórico	20
2.1. Técnicas de manufactura utilizadas en la fabricación de sensores flexibles	20
2.1.1. Serigrafía	21
2.1.2. Impresión huecograbado	22
2.1.3. Impresión por inyección de tinta	23
2.1.4. Flexografía	25
2.2. Materiales piezoeléctricos	25
2.2.1. Clasificación de los materiales piezoeléctricos	25
2.2.2. Mecanismo de funcionamiento de los materiales piezoeléctricos	26
2.3. dactilología en Lengua de Señas Mexicana	27
2.3.1. Concepto de dactilología	27
2.3.2. Mano dominante y mano base	28
2.3.3. Descripción de la dactilología en Lengua de Señas Mexicana	28
2.4. Anatomía de la mano humana en relación a los movimientos realizados en LSM	30
2.4.1. Anatomía de la mano humana	30
2.4.2. Grados de libertad en relación a los movimientos de la mano humana	31
2.5. Algoritmos de procesamiento de datos	33
2.5.1. Media móvil simple	33
2.5.2. Filtro de mediana	34
2.5.3. Media móvil exponencial	34
2.5.4. Fórmulas utilizadas en el análisis estadístico	35

3. Estado del arte	37
4. Propuesta de tesis	39
4.1. Criterios a tener en cuenta en el diseño del sensor	39
4.1.1. Longitud del sensor	40
4.1.2. Ancho del sensor	41
4.1.3. Resistencia eléctrica	41
4.2. Materiales de fabricación	42
4.2.1. Sustrato	42
4.2.2. Material piezoeléctrico	42
4.2.3. Material conductor	43
4.2.4. Material de las terminales	43
4.3. Instrumentos y software utilizados	45
4.3.1. Instrumentos de medición	45
4.3.2. Herramientas de fabricación	45
4.3.3. Dispositivos de control	45
4.3.4. Software	46
4.4. proceso de fabricación	46
4.5. Esquema de conexión eléctrico	48
4.6. caracterización del sensor	49
4.6.1. Dispositivo empleado para la medición de la resistencia eléctrica en función del ángulo de flexión	50
4.6.2. Metodología para la caracterización del sensor	61
4.7. Selección del algoritmo de procesamiento	61
4.8. Consideraciones	63
4.8.1. Efecto capacitivo del prototipo de sensor	63
5. Resultados	64

6. Conclusiones y trabajo futuro	73
6.1. Conclusiones	73
6.2. Discusión y trabajo futuro	74
A.	75

Índice de figuras

1.1. Articulaciones de la mano humana	17
2.1. Diagrama del proceso de serigrafía	21
2.2. Diagrama del funcionamiento de la impresión huecograbado .	23
2.3. Diagrama del funcionamiento de la impresión por inyección de tinta [1]	24
2.4. Alfabeto manual en Lengua de Señas Mexicana [2].	29
2.5. Números en Lengua de Señas Mexicana [9].	29
2.6. Estructura ósea de la mano humana.	31
2.7. Movimientos de flexión y extensión en los dedos de la mano humana [7].	32
2.8. Movimientos de aducción y abducción en los dedos de la mano humana [6].	32
4.1. <i>AWG - American Wire Gauge Current Ratings</i> [10].	44
4.2. Diagrama de la configuración de los elementos del sensor fle- xible(vista lateral).	47
4.3. Diagrama de la configuración de los elementos del sensor fle- xible(vista superior).	47
4.4. Sensor de resistencia flexible.	48

4.5. Esquema de conexión eléctrico del sensor flexible.	49
4.6. Diagrama de flujo del desarrollo del mecanismo auxiliar en la medición de la resistencia eléctrica y ángulo de flexión en el prototipo del sensor.	50
4.7. Diagrama de referencia de los ángulos (Φ y Θ) de flexión en el movimiento de aducción-abducción del prototipo.	52
4.8. Boceto del plano frontal del mecanismo auxiliar en la caracterización del sensor.	53
4.9. Boceto del plano frontal del mecanismo auxiliar en la caracterización del sensor, sin cotas.	54
4.10. Boceto del plano posterior del mecanismo auxiliar en la caracterización del sensor, sin cotas.	55
4.11. Imagen del modelo tridimensional del mecanismo auxiliar para la caracterización del sensor (versión ensamblada con la pieza encargada de medir el ángulo de flexión). Los diferentes componentes se distinguen por colores. No se muestran los componentes pertenecientes al otro eje debido a que el diseño es simétrico y utiliza las mismas piezas.	56
4.12. Imagen del modelo tridimensional del mecanismo auxiliar para la caracterización del sensor (versión ensamblada sin la pieza encargada de medir el ángulo de flexión, en su lugar se muestra otra pieza de color violeta que es un espejo de la pieza amarilla).	57
4.13. Simulación del movimiento del mecanismo auxiliar cuando $\Theta = 45^\circ$ y $\Phi = 0^\circ$	58
4.14. Simulación del movimiento del mecanismo auxiliar cuando $\Theta = 90^\circ$ y $\Phi = 0^\circ$	58

4.15. Vista previa de todas las piezas del mecanismo auxiliar para la caracterización del sensor dentro de <i>UltiMaker Cura</i>	59
4.16. Pieza del mecanismo auxiliar con transportador graduado. . .	60
4.17. $\Theta = 0^\circ$, $\Phi = 0^\circ$	62
4.18. $\Theta = 90^\circ$, $\Phi = 0^\circ$	62
4.19. $\Theta = 0^\circ$, $\Phi = 90^\circ$	62
4.20. Vista superior.	62
5.1. Señal del prototipo de sensor flexible(movimientos de aduc- ción-abducción). Azul: señal antes del procesamiento. Naran- ja: señal filtrada por media móvil exponencial.	66
5.2. Señal de un sensor flexible comercial(movimientos de aduc- ción-abducción). Azul: señal antes del procesamiento. Naran- ja: señal filtrada por media móvil exponencial.	67

Índice de cuadros

5.1. Resistencia eléctrica del prototipo de sensor flexible (Ω). . . .	68
5.2. Resistencia eléctrica del prototipo de sensor flexible debido al efecto capacitivo (Ω).	69
5.3. Resistencia eléctrica de un sensor flexible comercial ($k\Omega$). . . .	70
5.4. Precisión del prototipo de sensor flexible (A).	71
5.5. Precisión del prototipo de sensor flexible (B).	71
5.6. Precisión del prototipo de sensor flexible considerando el efecto capacitivo (A).	72
5.7. Precisión del prototipo de sensor flexible considerando el efecto capacitivo (B).	72

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En México habitan alrededor de 1.44 millones de personas con discapacidad auditiva, lo cual representa el 18.4% de la población total con discapacidad a 2018 de acuerdo a cifras reportadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [13]. Para la comunidad Sorda resulta realmente difícil integrarse a la sociedad como personas económicamente activas debido a la deficiencia en la educación que pueden recibir, esta situación es aún más evidente en los niños que con esta condición, quienes se ven privados de estímulos cognitivos en la etapa más crítica para el desarrollo humano.

En la actualidad se han propuesto diferentes métodos que facilitan la comunicación entre personas sordas y oyentes. Entre los métodos más destacados se encuentran los prototipos de guantes electrónicos (*smart gloves*) basados en diferentes tipos de sensores, incluyendo sensores de resistencia flexible, sensores ópticos, sensores inductivos, sensores capacitivos y sensores por efecto Hall. El sensor de resistencia flexible ha sido ampliamente utiliza-

do en estos sistemas para traducir Lengua de señas Mexicana(LSM) debido a su simplicidad para adaptar estos sensores a un guante electrónico y su disponibilidad de manera comercial. Como resultado, se pueden desarrollar prototipos de guantes transductores basados en resistencias flexibles en un corto periodo de tiempo debido a su capacidad de acoplamiento a los dedos de la mano que permiten al usuario generar movimientos naturales sin incomodidades.

1.2. Problemática

A pesar de que los sensores flexibles cuentan con especificaciones técnicas propicias para el desarrollo de guantes traductores de señas, una gran desventaja radica en su precio; cada unidad oscila entre los 350 y 800 pesos mexicanos dependiendo del fabricante. Teniendo en cuenta que cada guante requiere por lo menos 5 sensores (algunos prototipos en la literatura emplean más de 5 sensores por mano con el objetivo de obtener más grados de libertad), el precio de un prototipo de guante traductor que emplea resistencias flexibles como sensores principales para caracterizar la dactilología de una lengua de señas puede llegar a ser una limitante tanto para el usuario final, como para el desarrollo de esta área en la investigación y en la ingeniería.

Otra limitante de utilizar las resistencias flexibles que existen de manera comercial actualmente para un guante traductor de LSM es el hecho de que los fabricantes de estos sensores producen una reducida variedad de tamaños, siendo realmente difícil encontrar sensores de un tamaño distinto a 2.2 y 4.5 pulgadas de largo en el mercado. Como consecuencia de la poca variedad en las dimensiones de los sensores flexibles, los prototipos de estos guantes se han limitado a tamaños de mano genéricas o a utilizar múltiples sensores

en por cada dedo con la finalidad de poder obtener una señal adecuada que capture de manera fiel el signo que realiza la mano de una persona.

1.3. Justificación

En la actualidad existe muy poca documentación referente al mecanismo de funcionamiento detrás de las resistencias flexibles por parte de los fabricantes, además, de acuerdo con Caeiro et al. [4], no se ha prestado suficiente atención a este tema por parte de la comunidad académica en México, ya que no se cuenta con un solo guante traductor de LSM en el mercado. Consecuentemente, este estudio se enfoca en el diseño, fabricación y caracterización de sensores basados en resistencias flexibles para el desarrollo de prototipos de guantes electrónicos que faciliten la comunicación de los usuarios no oyentes en México.

1.4. Hipótesis

La descripción, caracterización y fabricación de un sensor flexible de bajo costo, facilitará el desarrollo de interfaces humano-máquina y contribuirá en la realización de futuros prototipos de *smart gloves* capaces de traducir Lengua de Señas Mexicana al español.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Caracterizar la señal proveniente de un prototipo de sensor flexible destinado al reconocimiento de la dactilología en Lengua de Señas Mexicana, así como describir su diseño y fabricación.

1.5.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la resistencia eléctrica para dos ángulos de flexión del sensor localizados en puntos de interés correspondientes a las articulaciones interfalángicas de la mano.
- Determinar la región de fiabilidad para ambos ángulos de flexión en el sensor.
- Describir el proceso de fabricación del prototipo.
- Describir el mecanismo empleado para la caracterización de la resistencia eléctrica en función el ángulo de flexión.
- Seleccionar los algoritmos de procesamiento óptimos para el reconocimiento de la señal producida por este prototipo de sensor flexible en el contexto de la dactilología de LSM.

1.6. Metodología

Para el desarrollo de este estudio se propuso la siguiente metodología:

1.6.1. Caracterización del sensor

Caracterizar la resistencia eléctrica para dos ángulos de flexión localizados en puntos de interés

Se procederá con la caracterización mediante la medición de la resistencia eléctrica en un rango de flexión de 0° - 90° en dos puntos de interés correspondientes a las articulaciones proximal-interfalángica y metacarpofalángica(interfalángica y metacarpofalángica en el caso del pulgar) de una mano humana como se ilustra en la figura 1.1. Se tomarán múltiples muestras por cada intervalo en el rango de flexión.

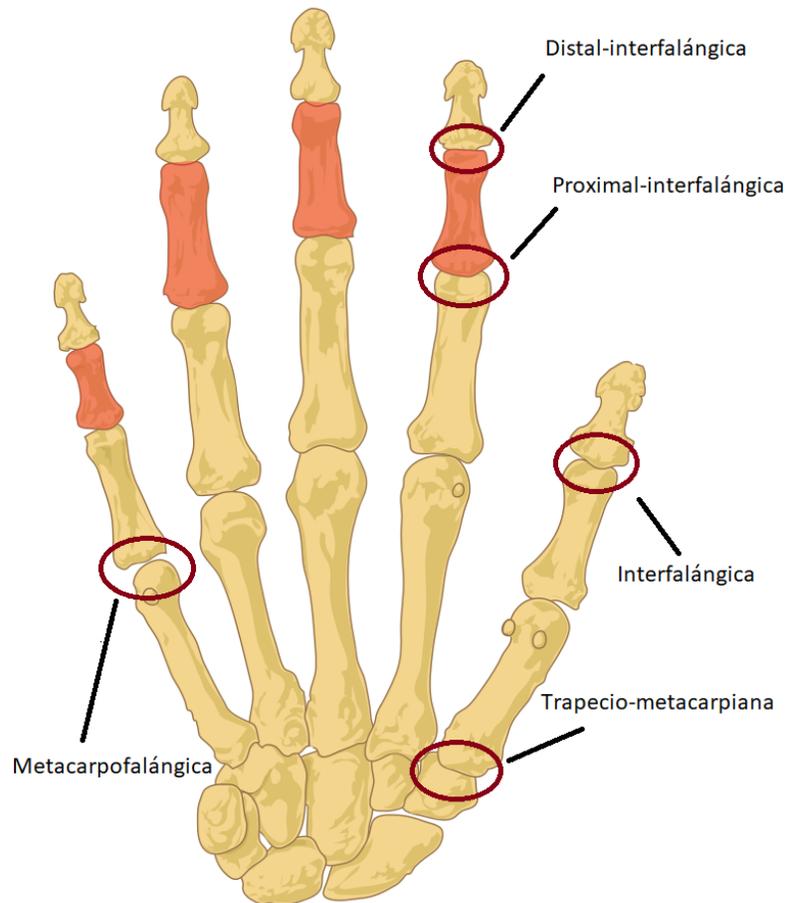


Figura 1.1: Articulaciones de la mano humana

Determinar la región de fiabilidad para ambos ángulos de flexión

Se determinará en que rango de ángulos de haber uno, existirá una fiabilidad de resultados. Consecuentemente, es importante seleccionar un número de muestras congruente.

Determinar el error de muestreo para los resultados en las mediciones

El error de muestreo se determinará de la misma manera basándose en si los resultados muestran un rango de fiabilidad adecuado o no.

1.6.2. Descripción del proceso de fabricación del sensor

Describir detalladamente las instrucciones en el proceso de fabricación del prototipo, así como los materiales empleados y sus propiedades mecánicas o eléctricas.

1.6.3. Descripción del mecanismo empleado en la caracterización del sensor

Mencionar el proceso en el diseño del mecanismo empleado para caracterizar la resistencia flexible en función de los diferentes ángulos en los puntos de interés. Se ilustrará cada una de sus partes y su funcionamiento.

1.6.4. Selección de algoritmos de procesamiento de la señal

Explorar la variedad de métodos matemáticos y estadísticos para el procesamiento de la señal con el objetivo de seleccionar el algoritmo que mejor se adapte a la tarea del reconocimiento de la dactilología de LSM.

1.7. Alcance y limitaciones

1.7.1. Alcance

Este trabajo pretende desarrollar un sensor flexible que pueda generar una señal aplicable al reconocimiento de la dactilología de signos estáticos en LSM y determinar sus características eléctricas bajo condiciones controladas.

1.7.2. Limitaciones

El trabajo se limita a la fabricación y caracterización del sensor en cuestión, no pretende desarrollar un *smart glove* capaz de traducir LSM al español.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se discutirá el marco teórico necesario para una mejor comprensión del tema de este trabajo.

2.1. Técnicas de manufactura utilizadas en la fabricación de sensores flexibles

Las técnicas de impresión para el desarrollo de circuitos flexibles más comúnmente utilizados de manera comercial[15] son las siguientes:

- Serigrafía.
- Impresión huecograbado.
- Impresión por inyección de tinta.
- Flexografía.

Cada una de estas técnicas de impresión requiere alguna forma de tinta para la transferencia del diseño a un sustrato. Las características del circuito resultante dependerán en gran medida del método utilizado, así como de las propiedades de la tinta empleada.

2.1.1. Serigrafía

La serigrafía es una técnica de impresión que consiste en transferir una tinta de viscosidad muy elevada a un sustrato pasando a través de un *stencil* (también referido a veces como "malla"). La herramienta que se emplea para presionar la tinta sobre el sustrato y el *stencil* suele ser de un material como el caucho. El área de impresión está delimitada por un marco que evita que la tinta se desborde al ser presionada.

Primero se deposita la tinta sobre el *stencil* y el fotolito, permitiendo pasar la tinta únicamente en las secciones deseadas, sin embargo, para que la tinta se adhiera de manera correcta es necesario aplicar presión con la herramienta de goma. En la figura 2.1 se puede observar un diagrama del proceso.

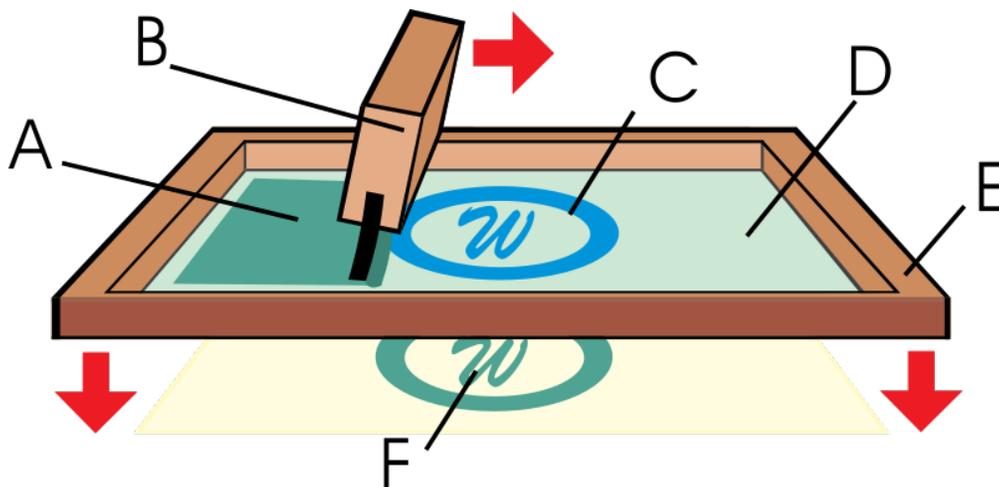


Figura 2.1: Diagrama del proceso de serigrafía

A) tinta, B) herramienta para esparcir la tinta (una plancha de aluminio en el caso de las máquinas industriales), C) *Stencil*, D) Fotolito, E) Marco, F) impresión sobre el sustrato.

En el contexto de la impresión de circuitos flexibles, las tintas suelen tener aditivos de materiales conductores de electricidad, el aditivo que se utiliza en la mayoría de ocasiones como elemento funcional es la plata en forma de copos o nano-partículas [14]. Por otra parte, lógicamente los sustratos a utilizar requieren de flexibilidad mecánica, Eshkeiti et al. [11] demostró tener éxito en la fabricación de un prototipo de circuito impreso (PCB) flexible en sustratos de vidrio y PET.

Las ventajas de la serigrafía en el contexto de la fabricación de circuitos flexibles son su capacidad para producir unidades de manera rápida y la posibilidad de obtener una gran resolución incluso después de miles de repeticiones sobre la misma malla si se cuenta con el equipo necesario.

2.1.2. Impresión huecograbado

Esta técnica de impresión consiste en grabar el diseño a imprimir sobre la superficie de un cilindro metálico, el cual suele ser de acero con recubrimiento de cobre. Este cilindro de grabado es colocado debajo del sustrato y de otro cilindro de caucho contra el que se ejercerá presión al rotar. El cilindro de grabado se sumerge en un reservorio de tinta de baja viscosidad de manera que el rodillo se mantenga entintado con cada revolución. La imagen se transfiere al sustrato debido a la presión que ejercen ambos cilindros sobre el mismo con su movimiento. Un diagrama del funcionamiento de esta técnica se puede observar en la figura 2.2

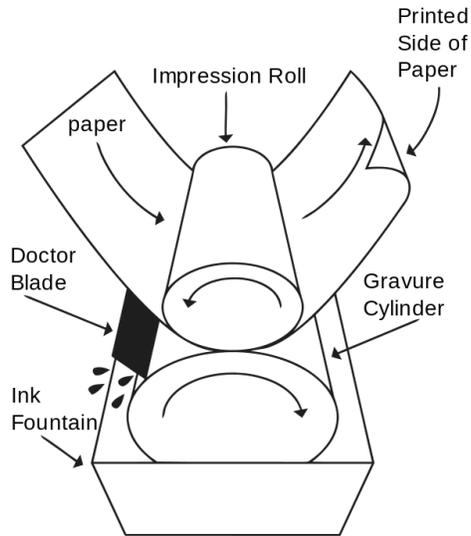


Figura 2.2: Diagrama del funcionamiento de la impresión huecograbado

La impresión en huecograbado es un método que destaca por la rapidez, robustez y durabilidad del sistema. Entre los circuitos impresos por esta técnica se encuentran algunos ejemplos de sensores flexibles de diferentes índoles, como el sensor de humedad flexible reportado por Reddy et al. [17]. En este artículo se describe la fabricación de un sensor de humedad capacitivo elaborado con un sustrato de PET, tinta con nano-partículas de plata (Ag) como elemento conductor y pHEMA, un polímero hidrofílico.

2.1.3. Impresión por inyección de tinta

La impresión por inyección de tinta utiliza la señal de una imagen digital para imprimir el diseño en el sustrato. La tinta utilizada en este método se encuentra en líquida y se deposita directamente en el sustrato en forma de pequeñas gotas. El proceso para la formación de estas gotas se realiza

mediante un transductor piezoeléctrico o térmico que controla el flujo de tinta en la boquilla de la impresora. Consecuentemente, se distingue entre impresoras de inyección de tinta piezoeléctricas y térmicas. En la figura [2.3] se observa un diagrama del funcionamiento de ambos tipos de inyección por tinta.

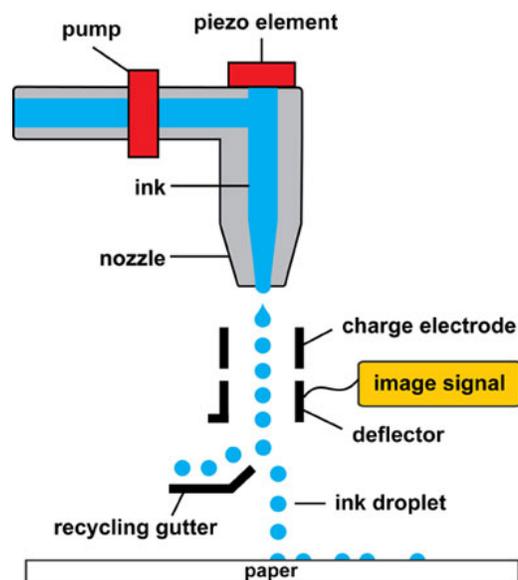


Figura 2.3: Diagrama del funcionamiento de la impresión por inyección de tinta [1]

Las ventajas de la inyección por tinta para el diseño de circuitos flexibles incluyen:

- Simplicidad en el control debido a su naturaleza digital
- Alta resolución de impresión
- Escalabilidad
- Buena relación costo-beneficio

Un circuito flexible pertinente a este proyecto incluye el desarrollado por Cao et al [5]. En ese estudio se describe el diseño y fabricación de un dio-

do Shottky orgánico flexible, el sustrato seleccionado para proporcionar la flexibilidad mecánica fue el PET.

2.1.4. Flexografía

La flexografía es un método de impresión de alta velocidad muy similar a la impresión en huecogrado debido a que también utiliza un rodillo con el diseño deseado grabado en relieve, de la misma manera este cilindro de acero se sumerge en un recipiente con tinta entre revoluciones. La tinta empleada en esta técnica de impresión varía en viscosidad, pero suelen preferirse tintas líquidas con un secado rápido.

A pesar de ser el método más rápido de impresión, existe muy poca literatura relacionada a su implementación en el desarrollo de sensores flexibles debido a falta de investigación al respecto [15]. Un ejemplo de la utilización de este método de impresión en la fabricación de sensores flexibles es el desarrollado por Benson et al. [3], en él se describe la fabricación de un sensor de glucosa a partir de nano-partículas de oro (Au) utilizando la flexografía como método de impresión.

2.2. Materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos son aquellos que generan una señal eléctrica (debido a la acumulación de cargas) a partir de un esfuerzo mecánico aplicado[16].

2.2.1. Clasificación de los materiales piezoeléctricos

El efecto piezoeléctrico se clasifica en dos tipos:

-Efecto piezoeléctrico directo: Este tipo de materiales producen electricidad al ser sometidos a estrés mecánico, consecuentemente, la electricidad producida es directamente proporcional al estrés mecánico aplicado sobre el material.

-Efecto piezoeléctrico inverso: Materiales que sufren un estrés mecánico o deformación al ser expuestos ante un campo eléctrico.

Por otra parte, los materiales piezoeléctricos también pueden clasificarse de acuerdo a su composición química. Se distingue entonces entre materiales piezoeléctricos cerámicos, polímeros y cristales.

2.2.2. Mecanismo de funcionamiento de los materiales piezoeléctricos

El efecto piezoeléctrico, como lo describe Mayeen et al. [16], puede ser explicado debido a la distribución de cargas eléctricas. Cuando el material no se encuentra bajo estrés mecánico, las cargas positivas y negativas dentro del material se encuentran balanceadas, consecuentemente no se produce una diferencia de potencial ni una corriente eléctrica. Al aplicarse una fuerza externa, el material sufre un estrés mecánico cuya magnitud está dada por la ecuación (2.1).

$$\text{estrés} = \frac{\text{fuerza aplicada}}{\text{sección transversal}} \quad (2.1)$$

De esta manera, el estrés mecánico produce un cambio en la posición relativa de las cargas con respecto a ellas mismas, lo cual genera un cambio en el momento di-polar. Como resultado de la deformación mecánica provocada

por la fuerza aplicada sobre el material, las cargas positivas tendrán una tendencia a acumularse en un extremo del material y las cargas negativas en el otro extremo; produciendo de esta manera una diferencia de potencial que a su vez permitirá el flujo de las cargas a través del material resultando en la generación de corriente eléctrica.

En el caso del efecto piezoeléctrico inverso, el material tiende a deformarse al ser expuesto a una diferencia de potencial, lo cual genera una atracción o repulsión electro-estática (dependiendo de la configuración de las cargas) e incrementa el cambio en la posición de las cargas.

2.3. dactilología en Lengua de Señas Mexicana

2.3.1. Concepto de dactilología

La dactilología (del griego "daktilos" -dedos-, y "logia" -ciencia-, ciencia de los dedos) es un sistema de comunicación diseñado para transmitir información mediante los dedos de las manos. Este sistema se utiliza habitualmente en las lenguas de señas como parte fundamental en la expresión de alfabetos manuales.

Al igual que las lenguas orales cuentan con diferencias fonéticas que las distinguen entre si, los sistemas de dactilología varían en función de la lengua oral a la que se adhieren. De esta manera cada lengua oral cuenta con su propia lengua de señas, que a su vez cuenta con su propio sistema de dactilología.

Además de utilizarse para la representación del alfabeto de una lengua oral, la dactilología se emplea para el deletreo de nombres propios, siglas, tecnología o palabras nuevas y cuando una persona oyente o un miembro de la comunidad sorda no conoce el signo de algún término.

2.3.2. Mano dominante y mano base

Dentro de los sistemas de lengua de señas existe el concepto de la mano dominante y la mano base. La mano dominante es la encargada de realizar los movimientos principales de un signo así como de indicar el sujeto y realizar dactilología, casi siempre es la mano con la que se tiene más destreza, sin embargo, esto no es siempre el caso. Por otra parte la mano base se utiliza como apoyo en la realización de algunas señas. Cabe mencionar que en la dactilología de LSM únicamente se utiliza la mano dominante para realizar caracteres del alfabeto, por lo que no se requiere de la mano base.

2.3.3. Descripción de la dactilología en Lengua de Señas Mexicana

El sistema de dactilología empleado en LSM representa el alfabeto del español utilizado en México. Este sistema reconoce los 27 caracteres del abecedario más todos aquellos existentes en el sistema numérico decimal. En la figura [2.4] se puede observar una imagen con todos los signos del alfabeto manual en LSM, de la misma manera en la figura [2.5] se puede apreciar una imagen con los signos correspondientes a los números en LSM.

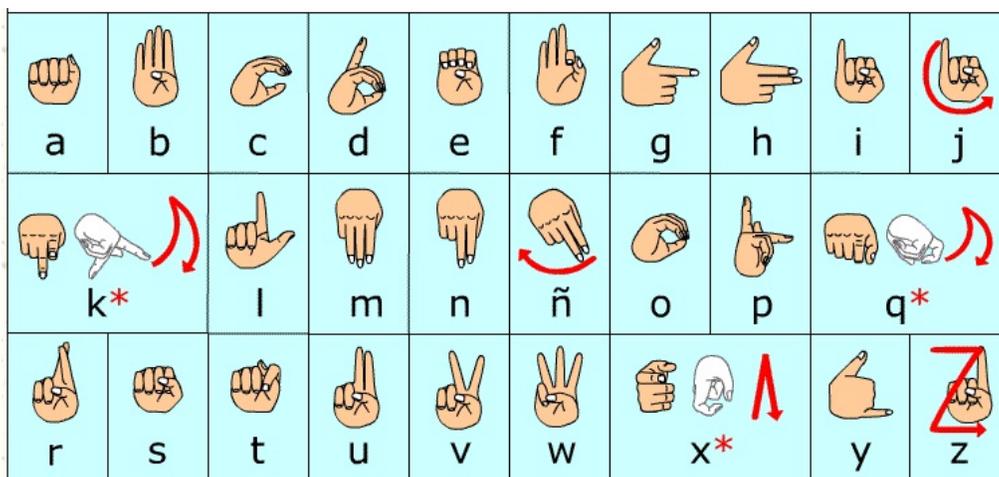


Figura 2.4: Alfabeto manual en Lengua de Señas Mexicana [2].

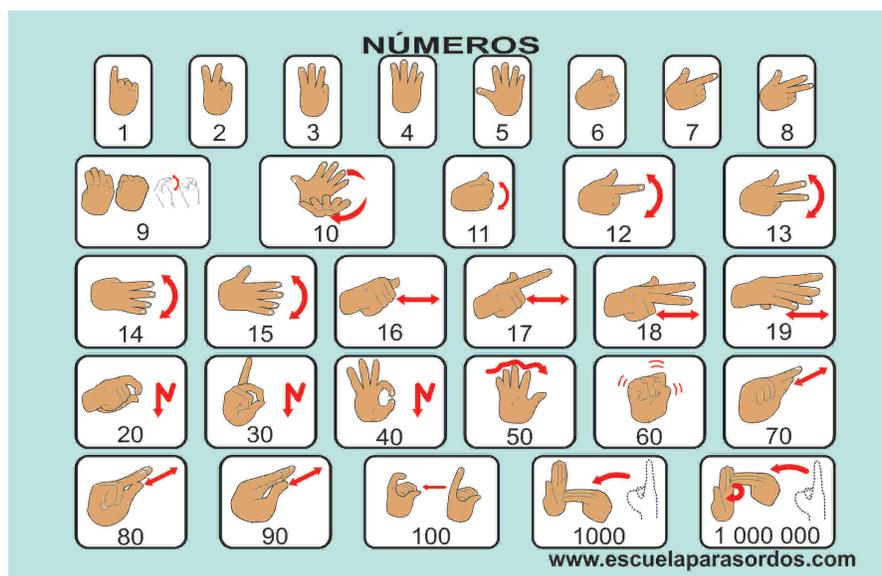


Figura 2.5: Números en Lengua de Señas Mexicana [9].

El alfabeto manual establecido para la Lengua de Señas Mexicana cuenta con dos tipos de signos; estáticos y dinámicos. Los signos dinámicos son

aquellos que requieren movimiento para la correcta realización de la letra que representan, los signos dinámicos en LSM corresponden a las letras "J", "K", "Ñ", "Q", "X", "Z", así como a algunos números. Por otra parte los signos estáticos son aquellos que no requieren de movimiento de la mano dominante para su realización. El tipo de movimiento de los signos dinámicos tanto en el alfabeto, como en números, se denota por las flechas rojas en las figuras 2.4 y 2.5 respectivamente.

2.4. Anatomía de la mano humana en relación a los movimientos realizados en LSM

2.4.1. Anatomía de la mano humana

La mano humana está compuesta por un total de 27 huesos, los cuales pueden ser clasificados de acuerdo a la zona en la que se encuentran ubicados, ver figura [2.6]. Ocho de ellos pertenecen a la región del carpo, cinco a la región del metacarpo y catorce a los falanges.

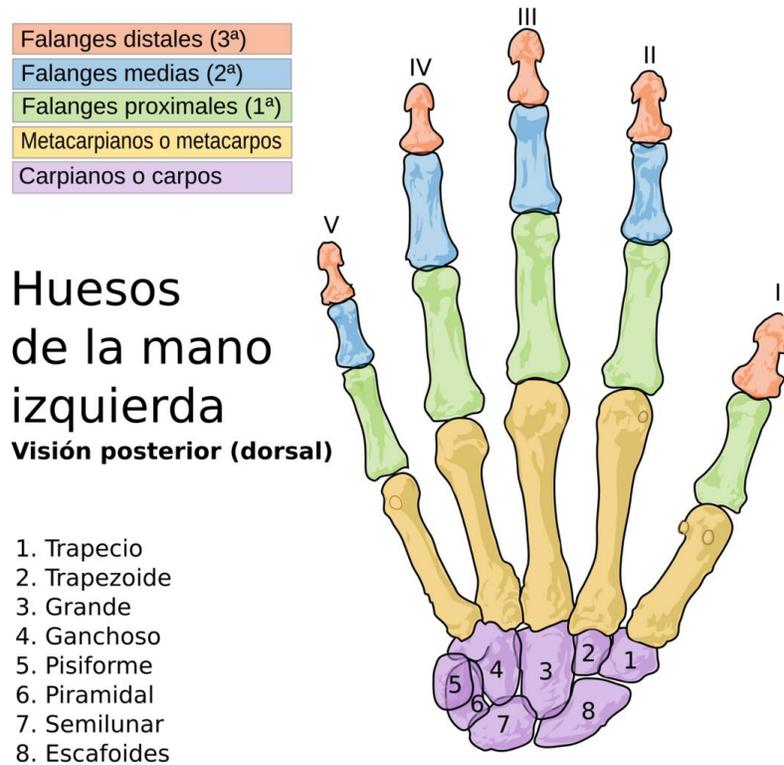


Figura 2.6: Estructura ósea de la mano humana.

Además, la anatomía describe 19 articulaciones presentes en la mano humana, ver figura [1.1]: cuatro articulaciones distal-interfalángicas, cuatro proximal-interfalángicas, cuatro metacarpofalángicas, cinco trapecio-metacarpianas y una única articulación interfalángica.

2.4.2. Grados de libertad en relación a los movimientos de la mano humana

De acuerdo a Caeiro et al. [4], el movimiento de la mano humana puede modelarse con 23 grados de libertad, cuatro en el pulgar, cuatro en cada uno de los otros dedos y tres en la muñeca.

Para cada dedo exceptuando el pulgar, las articulaciones proximal-interfalángica y distal-interfalángica son capaces de movimiento de flexión y extensión, ver figura 2.7, mientras que las articulaciones metacarpofalángicas pueden realizar movimientos de aducción y abducción además de flexión-extensión como se muestra en la figura 2.8.

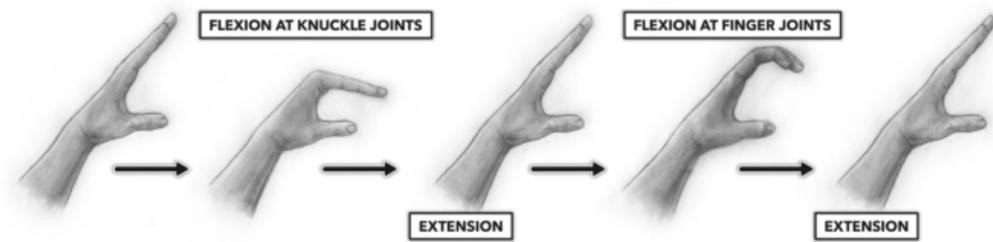


Figura 2.7: Movimientos de flexión y extensión en los dedos de la mano humana [7].

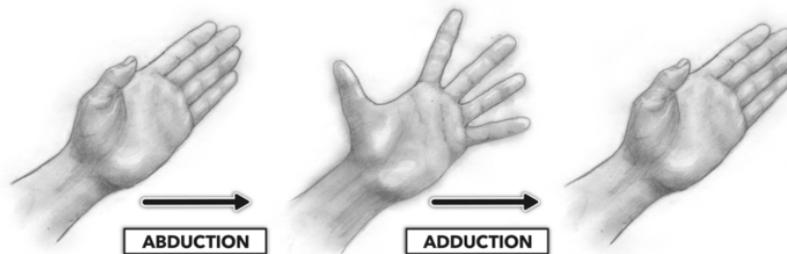


Figura 2.8: Movimientos de aducción y abducción en los dedos de la mano humana [6].

Por otra parte, el pulgar puede reproducir movimientos de flexión-extensión y abducción-aducción en sus 2 articulaciones(interfalángica y metacarpo-falángica).

2.5. Algoritmos de procesamiento de datos

Para seleccionar un algoritmo de procesamiento adecuado para filtrar una señal adquirida de determinado sensor es importante considerar algunos factores tales como la respuesta en tiempo real, el rendimiento computacional, la precisión requerida y la naturaleza del ruido presente en la señal. En esta sección se discuten los algoritmos más comúnmente utilizados para el procesamiento de señales de sensores.

2.5.1. Media móvil simple

El filtro de media móvil(SMA, por sus siglas en inglés) simple es un algoritmo básico utilizado para suavizar y reducir el ruido de una señal, Es un algoritmo sencillo de implementar y no consume muchos recursos, por lo que se dice que es un algoritmo de alto rendimiento computacional. Por otra parte, una desventaja de utilizar este algoritmo como herramienta de suavizado en una señal de sensor es que tiene una respuesta lenta a cambios en la señal.

El funcionamiento del filtro de SMA consiste en segmentar la señal original en un subconjunto o ventana de muestras a cada instante de tiempo. La ventana deslizante se mueve a lo largo de la señal y en cada posición de la ventana se calcula el promedio de las muestras contenidas en el subconjunto. El tamaño de la ventana determina la cantidad de muestras utilizadas para el cálculo del promedio. A medida que se desliza la ventana a lo largo de la

señal, se obtiene una nueva serie de valores filtrados.

2.5.2. Filtro de mediana

El algoritmo del filtro de mediana tiene un funcionamiento idéntico al de la media móvil simple, pero a diferencia de la media móvil, que utiliza promedios de muestras, el filtro de mediana selecciona el valor mediano dentro de una ventana deslizante como el valor filtrado.

El filtro de mediana es particularmente útil cuando se desea preservar las características de la señal, como los bordes o los picos, mientras se elimina el ruido. Sin embargo, puede introducir cierto retraso en la señal filtrada debido al procesamiento de la ventana.

2.5.3. Media móvil exponencial

El algoritmo de media móvil exponencial (EMA, por sus siglas en inglés) es una técnica comúnmente utilizada en el procesamiento de señales de sensores para suavizar y filtrar datos. Proporciona una estimación de la tendencia o comportamiento general de una señal, reduciendo el ruido y eliminando las fluctuaciones aleatorias.

El algoritmo de media móvil exponencial se basa en el concepto de suavizado exponencial, donde se asigna un peso exponencialmente decreciente a los valores pasados de la señal. A diferencia del algoritmo de media móvil simple, que asigna pesos iguales a los datos pasados, el EMA otorga mayor importancia a los datos más recientes. Esto significa que los datos más nuevos tienen un impacto mayor en el resultado final.

El modelo de este algoritmo de procesamiento de datos está descrito por la ecuación (2.2)

$$EMA(t) = \alpha * X(t) + (1 - \alpha) * EMA(t - 1) \quad (2.2)$$

Donde:

- $EMA(t)$ es el valor de la media móvil exponencial en el tiempo t .
- $X(t)$ es el valor de la señal en el tiempo t .
- $EMA(t-1)$ es el valor de la media móvil exponencial en el tiempo $t - 1$.
- α es el factor de suavizado exponencial, que determina el peso asignado a los valores pasados. Su valor se encuentra en el rango de 0 a 1.

El factor de suavizado exponencial α determina la rapidez con la que la media móvil responde a los cambios en los datos. Un valor más bajo de α dará más peso a los datos pasados y suavizará la señal aún más, pero también se adaptará más lentamente a los cambios. Por otro lado, un valor más alto de α hará que la media móvil responda más rápidamente a los cambios, pero también permitirá que el ruido tenga un mayor impacto en la señal suavizada.

2.5.4. Fórmulas utilizadas en el análisis estadístico

Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.3)$$

Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.4)$$

Coeficiente de variación porcentual

$$C_v \% = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2.5)$$

Capítulo 3

Estado del arte

En la actualidad, el desarrollo de sensores flexibles se ve gobernado por la investigación en tecnología de materiales, en específico la investigación en materiales bidimensionales. Muchos de los artículos de investigación más recientes que están relacionados a este tema se enfocan en el diseño, fabricación y la caracterización de elementos de electrónica flexible con el objetivo de aprovechar las propiedades cualitativas de materiales bidimensionales como el Grafeno, Germaneno o el Disulfuro de Molibdeno.

Se han observado importantes avances en los últimos años en el contexto de transductores flexibles basados en Grafeno o derivados, un ejemplo de esto es el sensor piezoresistivo flexible a base de grafito de pocas capas desarrollado por Tormo et al. [12] en 2023, en ese estudio se describe la fabricación de dicho transductor mediante exfoliación mecánica de una pasta de grafito para obtener láminas de este material flexible con propiedades piezoeléctricas. En cuanto al sustrato, utilizan láminas de polietileno de $80\ \mu\text{m}$ de espesor. Para caracterizar su respuesta desarrollaron un método con un enfoque similar al que se persigue en este trabajo de tesis, donde se pretende recrear la

interacción del sensor con el dedo de una mano humana.

Por otra parte, la caracterización de sensores flexibles piezoresistivos es un tema que ha tenido auge en la actualidad debido al amplio campo de aplicaciones en diferentes áreas. Se ha propuesto una variedad de métodos que involucran algún mecanismo de bisagra para la caracterización de las propiedades de curvatura, linealidad y ángulo de flexión de los transductores flexibles, sin embargo, los métodos más modernos involucran sistemas automatizados con motores a pasos para controlar el ángulo de flexión con mayor precisión y ambientes controlados de laboratorio. Un ejemplo de un sistema de caracterización de sensores piezoresistivos flexibles de estas características es el desarrollado por Saggio et al. [18], donde se describe una configuración experimental para caracterizar sensores flexibles comerciales contra el ángulo de flexión. En esta configuración utilizan motores a pasos PD-109-57 de Trinamic montados sobre un eje que sostiene una bisagra para controlar el ángulo de flexión. El protocolo que implementan en ese artículo consiste en medir un rango de flexión de 0° - 120° en intervalos de 5° manteniendo su posición en cada ángulo durante 10 segundos hasta llegar al mayor ángulo de flexión y de regreso para asegurar la repetibilidad del proceso.

Capítulo 4

Propuesta de tesis

En este capítulo se describirá el proceso de fabricación y los criterios en el diseño de un prototipo de sensor flexible realizado con materiales de bajo costo, además de la caracterización de su señal de salida bajo diferentes condiciones.

4.1. Criterios a tener en cuenta en el diseño del sensor

Para el diseño de una resistencia flexible es necesario tener en cuenta criterios como la longitud del sensor, el ancho del sensor, flexibilidad mecánica del material a utilizar como sustrato y resistencia eléctrica del sensor.

4.1.1. Longitud del sensor

Se seleccionó una longitud de 11.3 cm de extremo a extremo en el sustrato del sensor, la razón de esta selección es para poder comparar la señal con un sensor comercial de 4.5 pulgadas o aproximadamente 11.4 cm. Todas las mediciones del prototipo de sensor flexible en este estudio se realizan sobre este diseño.

Cabe mencionar que un requisito indispensable en el diseño de una resistencia flexible como la planteada en este trabajo es que su longitud sea mayor a la longitud del falange proximal del dedo en cuestión, esto debido a que se busca caracterizar la señal eléctrica producida por un movimiento de flexión-extensión en las articulaciones metacarpofalángicas y proximal-interfalángicas (interfalángica en el caso del dedo pulgar). Consecuentemente, la longitud mínima que pudiera tener un sensor flexible de estas características dependerá del dedo en cuestión y la longitud del falange proximal en determinado usuario.

Referente a la longitud del falange proximal en seres humanos, Garrido et al. [19] determinaron que el promedio de la longitud máxima del falange proximal del tercer dedo de la mano (el cual se considera el dedo más largo en la mano humana) en humanos modernos es de 45.17 mm, mientras que la longitud máxima promedio de esa misma articulación en el dedo meñique es de 33.46 mm para el mismo grupo. Teniendo en cuenta estos datos en el contexto del requisito mencionado anteriormente, la selección de la longitud en el diseño del sensor expuesto en este estudio se encuentra justificada.

4.1.2. Ancho del sensor

Para el diseño del sensor aquí descrito se seleccionó un ancho de 1.5 cm, lo cual es mucho mayor que los 6.5 mm de ancho que suelen emplearse en los sensores comerciales. Dicho esto, el ancho no representa un factor crítico en el funcionamiento del sensor debido a que el movimiento que busca interpretar la señal es el de flexión-extensión a lo largo de un dedo (es decir la longitud del sensor), sin embargo, si se consideraron dos criterios al seleccionarlo: Facilidad de fabricación y ergonomía.

El proceso de fabricación se ve facilitado por un ancho no tan reducido debido a las dimensiones y características intrínsecas de los materiales utilizados. Por otra parte la ergonomía del sensor no se ve afectada por esta selección ya que como se plantea en el estudio de Garrido et al. [19], el ancho promedio en los falanges proximales del dedo meñique en humanos modernos es de 14.33 mm, lo cual representa únicamente la estructura ósea, si se tiene en cuenta el grosor de la piel y el tejido muscular se puede afirmar con confianza que los sensores de 1.5 cm de ancho no obstruirán el movimiento de abducción-aducción de los dedos de la mano.

4.1.3. Resistencia eléctrica

El parámetro indispensable que se desea en la resistencia flexible descrita en este trabajo es la variación de la resistencia eléctrica en función del ángulo de flexión. Por otra parte, otros parámetros importantes pero no indispensables son un rango amplio de resistencia eléctrica para facilitar la caracterización de la señal, y un comportamiento lineal de la resistencia.

4.2. Materiales de fabricación

4.2.1. Sustrato

Para la selección del sustrato del sensor se hicieron pruebas con dos materiales distintos, el primero de ellos es el PET en su presentación de película para laminado térmico, el segundo es el acetato en lámina utilizado para impresoras de toner.

Las láminas de PET poseen una gran flexibilidad mecánica, además este material cuenta con múltiples antecedentes en la fabricación de sensores flexibles [5, 11, 17]. Sin embargo, se descartó este material como sustrato del prototipo de sensor en este estudio debido a dificultades en el proceso de fabricación.

Por otra parte las láminas de acetato presentan de igual manera una buena flexibilidad mecánica y fueron las seleccionadas como material en el sustrato del sensor.

4.2.2. Material piezoeléctrico

El material con propiedades piezoeléctricas seleccionado es el *Velostat*, también conocido como *Linqstat*. Este material está hecho de láminas poliméricas a las cuales se les añade negro de carbón con el objetivo de que adquiera sus propiedades eléctricas. Este material piezoresistivo se selecciona por sus propiedades piezoresistivas, amplia disponibilidad y bajo costo.

Este material disminuye su resistencia eléctrica al ser sometido a estrés mecánico por presión o por flexión, siendo un candidato ideal para el diseño de sensores flexibles. Por otra parte, el *Velostat* cuenta con gran disponibilidad debido a su amplio uso en el embalaje de dispositivos susceptibles a descargas

electrostáticas. De igual manera resulta un material económicamente viable en el desarrollo de sensores de estas características, una hoja de *Velostat* de (21.59 x 27.94)cm del fabricante Steren tiene un costo de \$ 100.00 MXN y pueden fabricarse aproximadamente 20 sensores de las dimensiones descritas en este estudio.

4.2.3. Material conductor

Como material conductor de electricidad se selecciona el cobre, concretamente una cinta de cobre adhesiva de 5 mm de ancho y 0.1 mm de espesor.

El principal motivo de selección de esta cinta de cobre son sus dimensiones, 5 mm de ancho en el material conductor permite tener un sensor con dimensiones adecuadas para el ancho de las articulaciones de los dedos en la mayoría de personas y es un número similar al observado en los sensores comerciales. Además al ser una cinta conductiva por una cara y adhesiva por la otra, resulta práctica en el proceso de fabricación del sensor con la metodología aquí expuesta.

4.2.4. Material de las terminales

El material de las terminales es un cable conductor aislado de núcleo sólido de cobre calibre #22 AWG.

Para la selección del material de las terminales se considera únicamente el criterio de la ampacidad del conductor. La cantidad de corriente que circulará a través del sensor dependerá principalmente del valor de R_1 , el resistor conectado al sensor en configuración de divisor de tensión. Este resistor es el único que limita la corriente en los instantes de tiempo que el sensor (R_2) tiene un valor de 0Ω . Teniendo en cuenta que la fuente de alimentación

utilizada en el sistema es de 5 Vcc y el valor de $R_1 = 270 \Omega$ para una potencia de 1/4 W (el valor de R_1 se seleccionó arbitrariamente considerando no exceder la potencia disipada en ningún momento), la corriente máxima que circularía en un instante a través del sensor y por consiguiente a través de sus terminales sería de aproximadamente 18.5 mA de acuerdo a la ley de Ohm. De esta manera cualquier conductor que soporte una corriente mayor a esta es adecuado, sin embargo, se selecciona el calibre #22 de cobre y núcleo sólido debido a su facilidad de adquisición. En la figura 4.1 se puede apreciar que el conductor seleccionado efectivamente es adecuado para estos valores de corriente.

AWG	Diameter (mm)	Diameter (in)	Square (mm ²)	Resistance Copper (ohm/1000m) (ohm/1000ft)	Resistance Aluminum (ohm/1000m) (ohm/1000ft)	Typical Max. Current Load Ratings - Copper (amps) ¹⁾					
						Single Core	Multicore				43 and above
							up to 3 cores	4 - 6 cores	7 - 24 cores	25 - 42 cores	
40	0.08	.	0.0050	3448	5300						
39	0.09	.	0.0064	2693	4141						
38	0.10	0.0040	0.0078	2210	3397						
37	0.11	0.0045	0.0095	1810	2789						
36	0.13	0.0050	0.013	1326	2038						
35	0.14	0.0056	0.015	1120	1767						
34	0.16	0.0063	0.020	862	1325						
33	0.18	0.0071	0.026	663	1019						
32	0.20	0.0080	0.031	556	855						
30	0.25	0.010	0.049	352	541						
28	0.33	0.013	0.080	216	331						
27	0.36	0.014	0.096	180	276						
26	0.41	0.016	0.13	133	204						
25	0.45	0.018	0.16	108	166						
24	0.51	0.020	0.20	88	133	3.5	2	1.6	1.4	1.2	1.0
22	0.64	0.025	0.33	52	80	5.0	3	2.4	2.1	1.8	1.5
20	0.81	0.032	0.50	34	53	6.0	5	4.0	3.5	3.0	2.5
18	1.0	0.040	0.82	21	32	9.5	7	5.6	4.9	4.2	3.5
16	1.3	0.051	1.3	13	20	15	10	8.0	7.0	6.0	5.0
14	1.6	0.064	2.1	8.2	13	24	15	12	10	9.0	7.5
13	1.8	0.072	2.6	6.6	10						
12	2.1	0.081	3.3	5.2	8.0	34	20	16	14	12	10
10	2.6	0.10	5.3	3.3	5.0	52	30	24	21	18	15
8	3.3	0.13	8.3	2.1	3.2	75	40	32	28	24	20
6	4.1	0.17	13.3	1.3	2.0	95	55	44	38	33	27
4	5.2	0.20	21.2	0.81	1.3	120	70	56	49	42	35
3			26.7	0.65	0.99	154	80	64	56	48	40
2	6.5	0.26	33.6	0.51	0.79	170	95	76	66	57	57
1	7.4	0.29	42.4	0.41	0.63	180	110	88	77	66	55
0 (1/0)	8.3	0.33	53.5	0.32	0.50	200					
00 (2/0)	9.3	0.37	67.4	0.26	0.39	225					
000 (3/0)	10.4	0.41	85.0	0.20	0.32	275					
0000 (4/0)	11.7	0.46	107	0.16	0.25	325					
250			127			345					
300			152			390					
400			178			415					

Figura 4.1: AWG - American Wire Gauge Current Ratings [10].

4.3. Instrumentos y software utilizados

4.3.1. Instrumentos de medición

- Calibre(*Vernier*).
- Multímetro digital (MUL-282) marca Steren.
- Escalímetro.

4.3.2. Herramientas de fabricación

- Exacto *cutter*.
- tabla de corte
- Lápiz adhesivo
- Plancha para cabello.
- Impresora de papel.
- Impresora 3D *Ender 3 V2*.
- Pinzas para cables.
- Estación de soldadura.

4.3.3. Dispositivos de control

- Microcontrolador Arduino Uno R3.

4.3.4. Software

- *Fusion 360*.
- *Inkscape*.
- *UltiMaker Cura*.

4.4. proceso de fabricación

El proceso de fabricación comienza con el corte del sustrato, conductor y material piezoresistivo a las medidas requeridas del sensor, para ello se utiliza el *cutter* sobre una tabla de corte. Se corta una sección de la hoja de acetato PET de (22.6 x 1.5)cm para tener 2 capas de sustrato al doblarse longitudinalmente, una sección de (9.7 x 1.1)cm de *Velostat* y dos tramos de 10.7 cm de cinta de cobre adherible.

Posteriormente se dobla longitudinalmente el sustrato para obtener dos capas de (11.3 x 1.5)cm y se coloca sobre el interior de cada una de estas capas la cinta adherible de cobre, de tal manera que ambas cintas queden centradas con respecto al ancho del sensor y a sí mismas. Tras posicionar las cintas de cobre, se solda a sus extremos los cables conductores de las terminales y se coloca la tira de *Velostat* entre ambas cintas de manera que impidan un cortocircuito. La figura 4.2 muestra una vista lateral de la configuración de este arreglo de sensor, mientras que la figura 4.3 muestra la vista superior.



Figura 4.2: Diagrama de la configuración de los elementos del sensor flexible(vista lateral).



Figura 4.3: Diagrama de la configuración de los elementos del sensor flexible(vista superior).

Por último, se procede a transferir calor a este sándwich de elementos, para ello se utiliza una plancha de cabello, pero puede emplearse cualquier dispositivo que transfiera calor de manera uniforme a la superficie del sensor. Al sostener el sensor entre las placas de la plancha se consigue que todos los elementos sean fijados de manera permanente en su lugar.

En la figura se observa el sensor flexible una vez completada su fabricación.

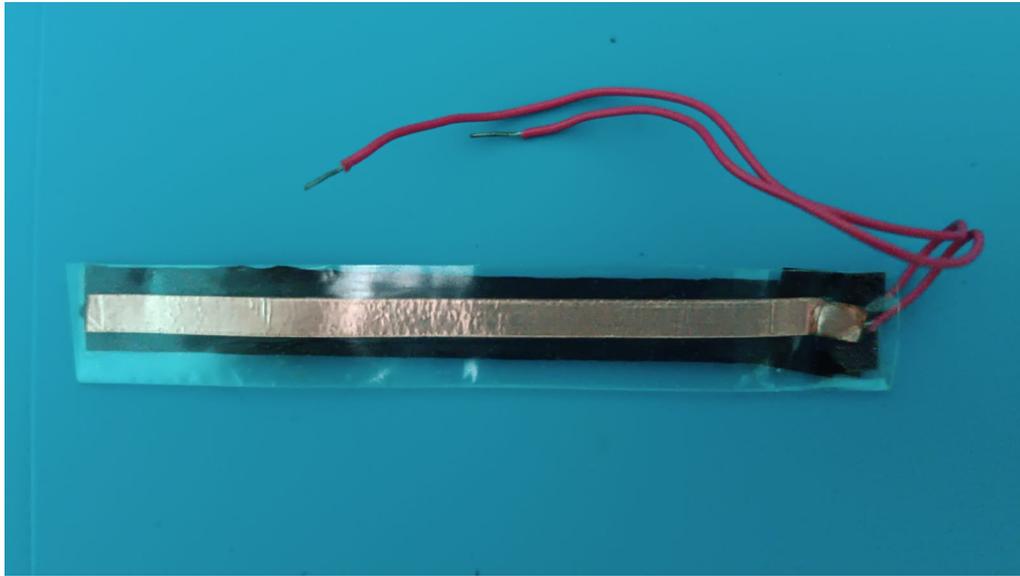


Figura 4.4: Sensor de resistencia flexible.

4.5. Esquema de conexión eléctrico

El sensor se conecta a un microcontrolador Arduino Uno R3 mediante una configuración de divisor de tensión para la adquisición de datos. En la figura 4.5 se muestra un diagrama de conexión del sistema para un solo sensor, en él se observa que el sensor flexible ocupa la posición de la resistencia R_2 dentro del divisor de tensión.

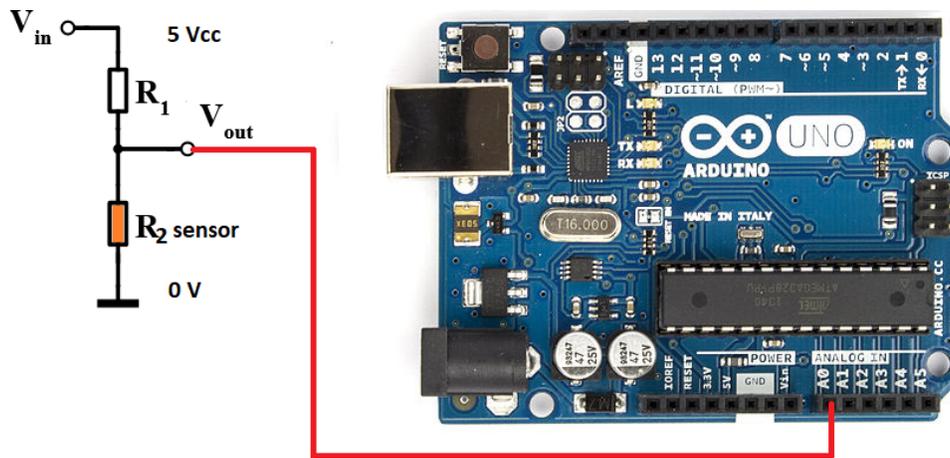


Figura 4.5: Esquema de conexión eléctrico del sensor flexible.

La señal a la salida del divisor de tensión es un voltaje que cambia en el tiempo, esta señal se envía a la tarjeta Arduino a través del puerto A0 para su procesamiento.

4.6. caracterización del sensor

La caracterización de la señal eléctrica que el sensor produce al sufrir estrés mecánico debido al movimiento de flexión-extensión en alguno de los dedos de la mano depende directamente del ángulo de flexión que se tenga en las articulaciones del dedo en cuestión. Es por esto que resulta esencial medir con precisión la respuesta de la resistencia eléctrica al cambio en el ángulo de flexión. Por lo anterior fue necesario desarrollar un dispositivo mecánico auxiliar en la medición de la resistencia eléctrica con respecto a la deformación del sensor.

4.6.1. Dispositivo empleado para la medición de la resistencia eléctrica en función del ángulo de flexión

El desarrollo de este mecanismo se puede expresar con el diagrama de flujo de la figura 4.6.

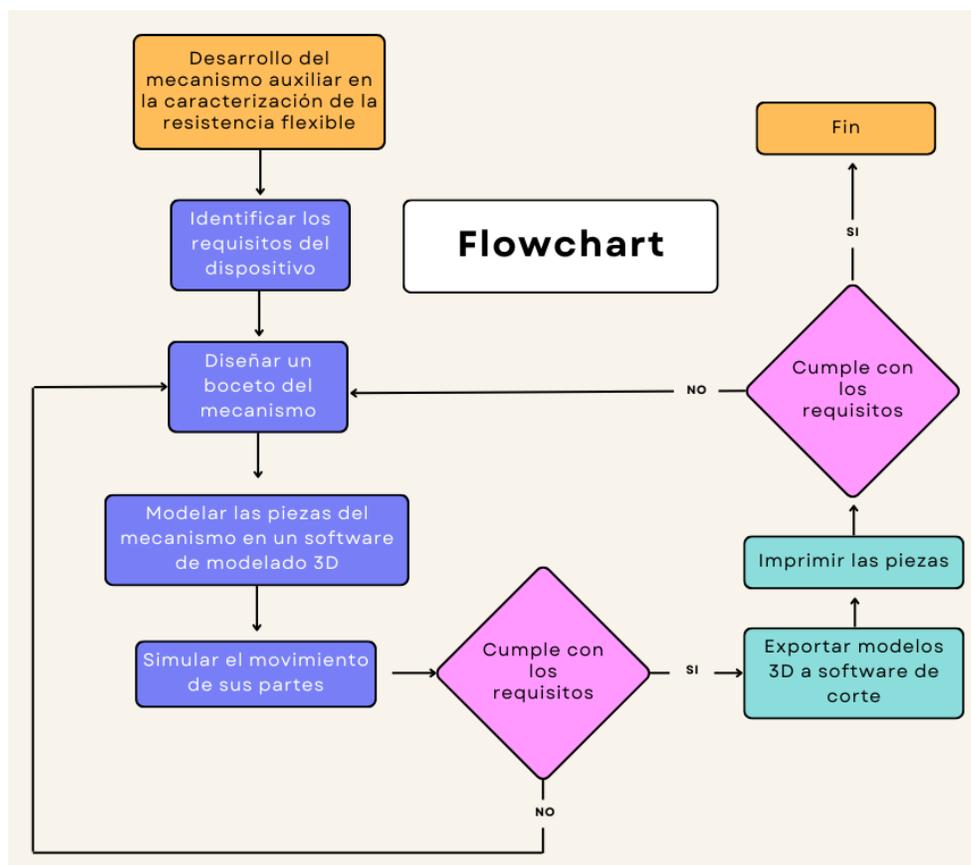


Figura 4.6: Diagrama de flujo del desarrollo del mecanismo auxiliar en la medición de la resistencia eléctrica y ángulo de flexión en el prototipo del sensor.

Todos los archivos relacionados al mecanismo auxiliar en la medición de la resistencia eléctrica del sensor se adjuntan dentro de una memoria USB anexa a este documento.

Identificación de los requisitos del mecanismo

El primer paso es la identificación de los requisitos del mecanismo:

- El diseño debe ser tal que permita el fácil ensamble y desensamble de todas las piezas.
- Las piezas deben ser posibles de fabricar en una impresora por deposición de material fundido (FDM por sus siglas en inglés).
- El diseño debe ser tal que no requiera tornillería ni materiales adicionales.
- Debe localizar los dos puntos correspondientes a los ángulos de flexión a una distancia mínima de 45.17 mm entre sí.
- Ambos ejes correspondientes a los ángulos de flexión deben poder rotar libremente de 0° a 90° . Ver figura 4.7.
- El mecanismo debe contar con alguna manera de sujetar el sensor para evitar que se mueva mientras se realizan mediciones o se desplazan los ejes.

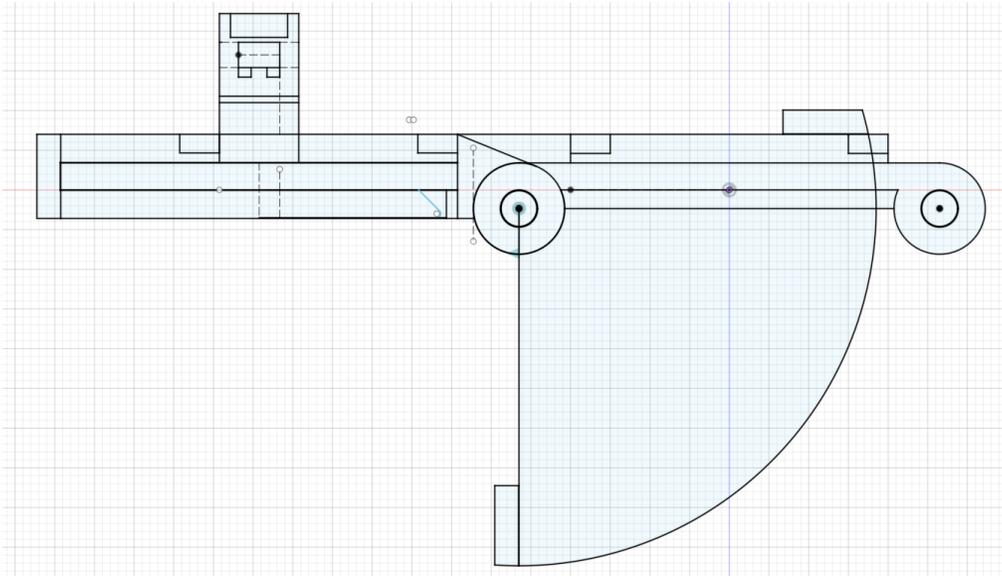


Figura 4.9: Boceto del plano frontal del mecanismo auxiliar en la caracterización del sensor, sin cotas.

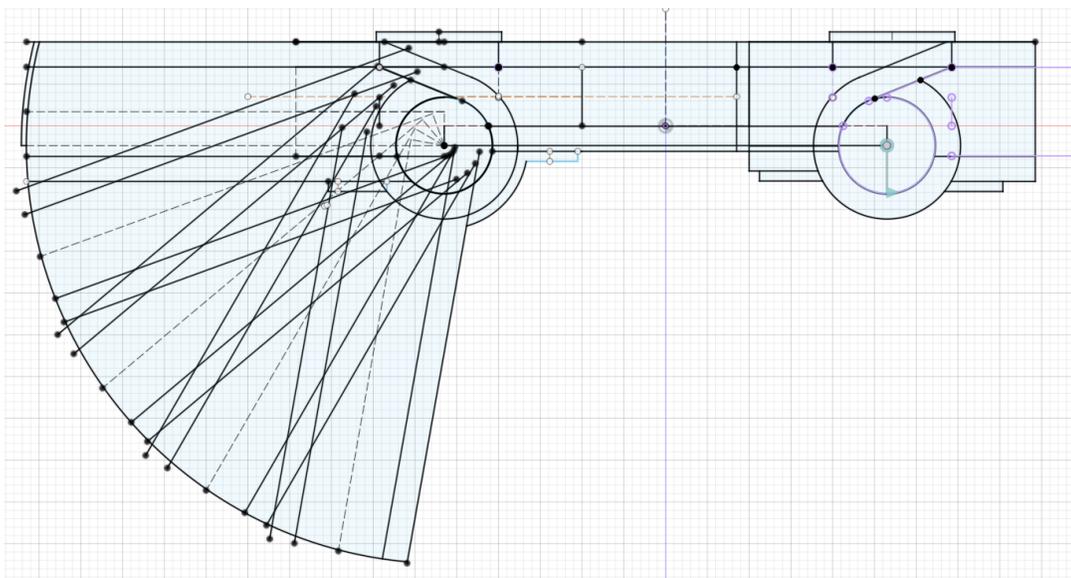


Figura 4.10: Boceto del plano posterior del mecanismo auxiliar en la caracterización del sensor, sin cotas.

Modelado de las piezas

Esta sección ilustra los modelos tridimensionales creados en *Fusion 360* a partir de los bocetos anteriores. Las piezas se modelaron teniendo en cuenta un diseño simétrico con el objetivo de reducir el número de archivos necesarios para imprimir (algunas piezas se imprimen más de una vez). Cabe resaltar que el mecanismo fue diseñado para medir un solo ángulo de flexión a la vez. La figura 4.11 muestra el modelo tridimensional del mecanismo ensamblado con la pieza encargada de medir el ángulo de flexión, mientras que la figura 4.12 muestra el mismo modelo pero sin la pieza encargada de medir el ángulo de flexión (en su lugar muestra una pieza espejo del componente amarillo en ambas imágenes que sustituye al componente azul cuando su eje no corresponde al que mide el ángulo de flexión).

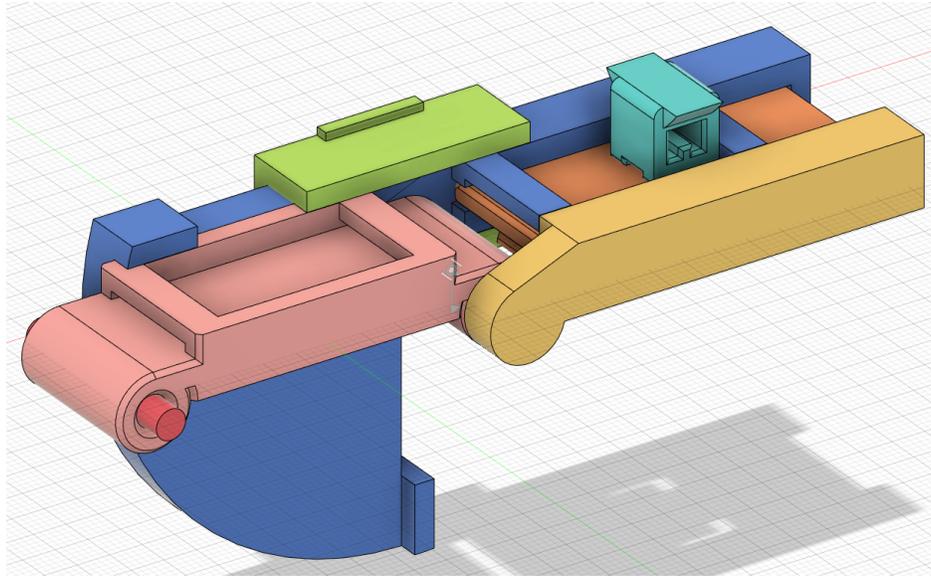


Figura 4.11: Imagen del modelo tridimensional del mecanismo auxiliar para la caracterización del sensor (versión ensamblada con la pieza encargada de medir el ángulo de flexión). Los diferentes componentes se distinguen por colores. No se muestran los componentes pertenecientes al otro eje debido a que el diseño es simétrico y utiliza las mismas piezas.

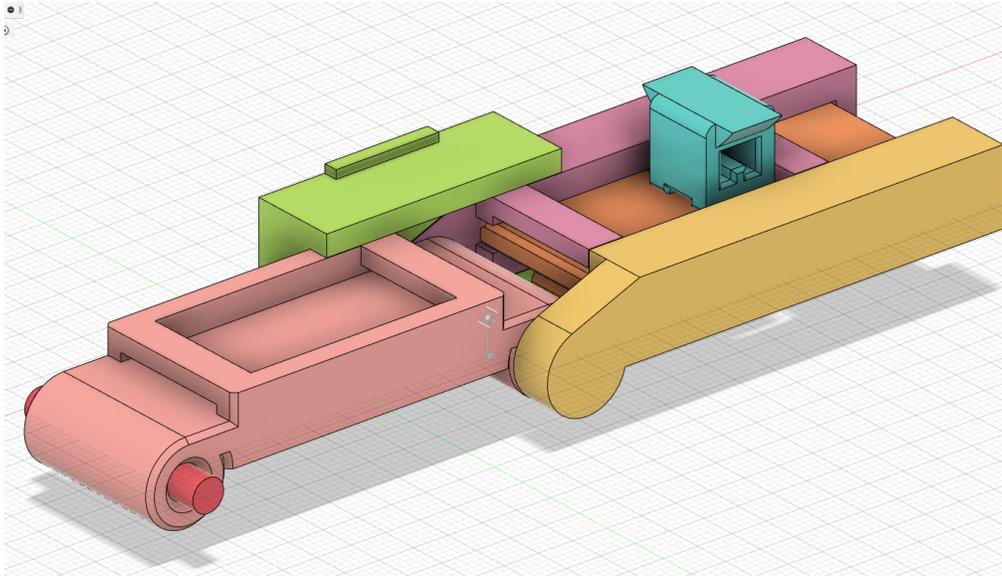


Figura 4.12: Imagen del modelo tridimensional del mecanismo auxiliar para la caracterización del sensor (versión ensamblada sin la pieza encargada de medir el ángulo de flexión, en su lugar se muestra otra pieza de color violeta que es un espejo de la pieza amarilla).

Simulación del movimiento de las piezas

La simulación del movimiento de las piezas del mecanismo auxiliar se realizó en el software *Fusion 360*. Las imágenes 4.13 y 4.14 muestran el movimiento que tendría el mecanismo cuando el ángulo Θ vale 45° y 90° respectivamente (Φ se mantiene constante en un valor de 0°). Nótese que la pieza verde ya no está sujetando las piezas relacionadas al ángulo Θ , esto con el objetivo de permitir el movimiento en Θ y poder ser utilizada para mantener fijas las piezas relacionadas al ángulo Φ que no aparecen en las imágenes debido a que son exactamente las mismas para Φ .

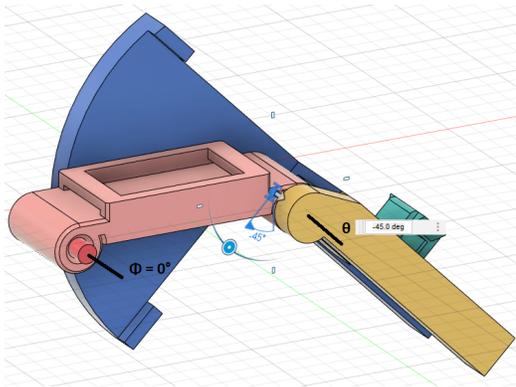


Figura 4.13: Simulación del movimiento del mecanismo auxiliar cuando $\Theta = 45^\circ$ y $\Phi = 0^\circ$.

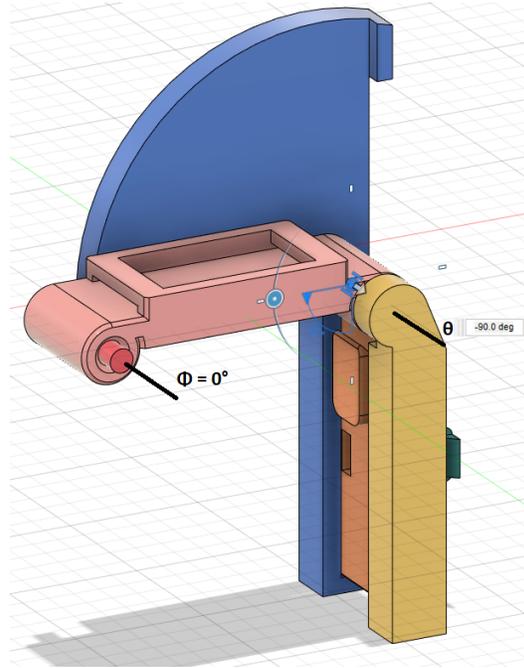


Figura 4.14: Simulación del movimiento del mecanismo auxiliar cuando $\Theta = 90^\circ$ y $\Phi = 0^\circ$.

Slicing de los objetos 3D

Se utilizó el software *UltiMaker Cura* para realizar el *Slicing* de los modelos 3D creados en *Fusion 360*. La figura 4.15 es una vista previa de todas las piezas del mecanismo auxiliar antes de ser impresas.

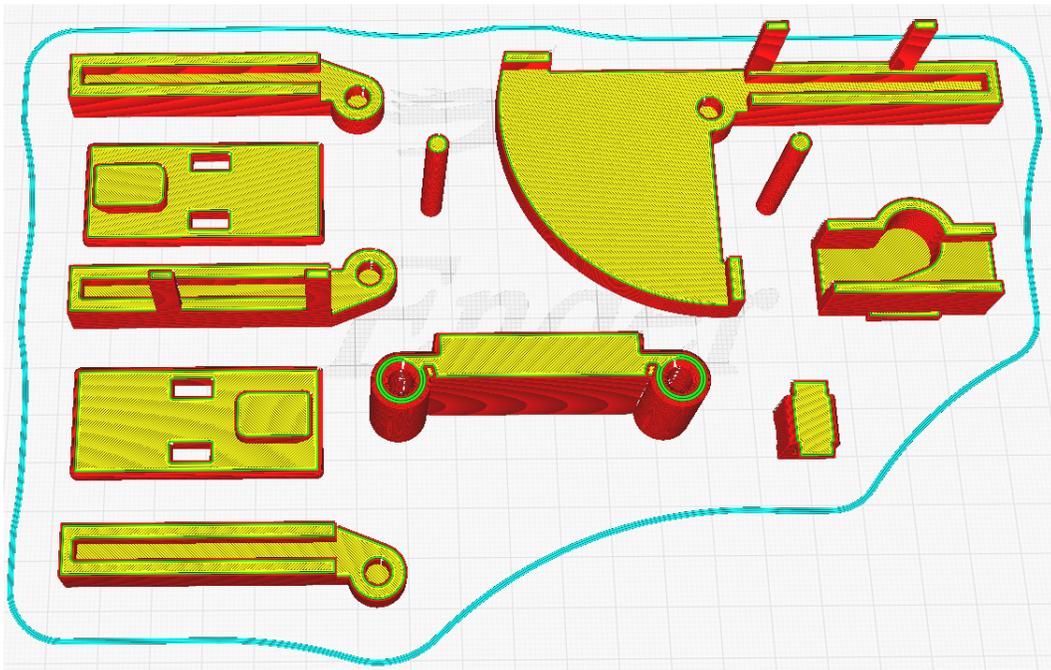


Figura 4.15: Vista previa de todas las piezas del mecanismo auxiliar para la caracterización del sensor dentro de *UltiMaker Cura*.

Todas las piezas han sido diseñadas para evitar el uso de soportes y así reducir los tiempos de impresión y la cantidad de material utilizado.

Impresión del mecanismo

La impresión del mecanismo se realiza en una impresora 3D *Ender 3 V2* y el material utilizado es el ácido poliláctico (PLA por sus siglas en inglés). El tiempo que demora la impresión de todas las piezas es de aproximadamente 7 horas con una altura de capa de 0.2 mm en la *Ender 3 V2*.

Además de las impresiones de las piezas, el mecanismo requiere de un transportador graduado de 0° a 90° a medida de la pieza azul de la figura 4.11, para el diseño de este transportador particular se utilizó el software *Inkscape*. Posterior a la impresión del transportador se utiliza lápiz adhesivo para adherirlo a la pieza azul como se muestra en la figura 4.16.

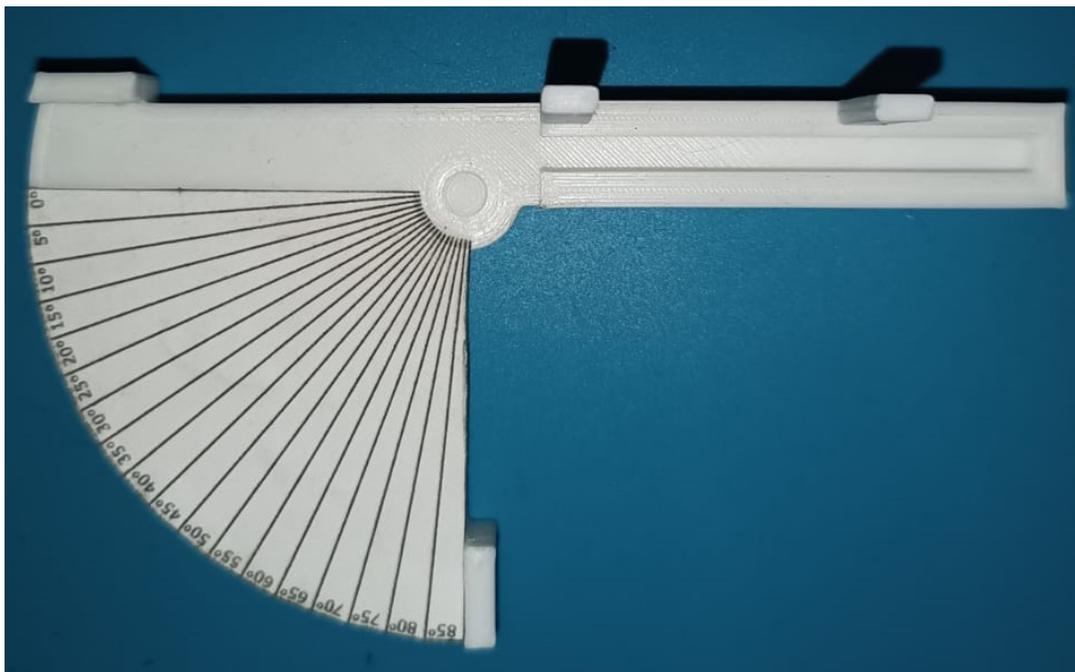


Figura 4.16: Pieza del mecanismo auxiliar con transportador graduado.

Las figuras 4.17 y 4.18 muestran el mecanismo terminado con el ángulo Φ constante y Θ variable, mientras que la figura 4.19 con el ángulo Θ constante y Φ variable. Por otra parte la figura 4.20 ilustra una perspectiva superior del mecanismo terminado y el sensor flexible colocado para su medición.

4.6.2. Metodología para la caracterización del sensor

Para caracterizar la señal del sensor flexible es necesario conocer cómo varía la resistencia eléctrica en función de la flexión mecánica y evaluar su comportamiento mediante la toma de múltiples muestras. Para este trabajo se ha decidido seccionar los dos ángulos de flexión Θ y Φ en intervalos de 5° , es decir se ha dividido el ángulo de flexión en 19 segmentos de 5° cada uno. Las muestras de la resistencia eléctrica para los segmentos de ángulo de Φ y de Θ se medirán por separado utilizando el mecanismo auxiliar descrito en este capítulo. Bajo estos parámetros se busca determinar la región donde opera correctamente el prototipo de sensor flexible.

4.7. Selección del algoritmo de procesamiento

El algoritmo que se propone para procesar la señal proveniente de la resistencia flexible descrita es la media móvil exponencial. Se ha propuesto este algoritmo debido a que no es de interés conservar características de la señal como picos, por lo cual el filtro de mediana no sería una buena opción, por otra parte, la media móvil exponencial es un algoritmo de complejidad computacional relativamente baja, a diferencia de otros métodos como el filtro de Kalman, por lo que debería ser fácil de implementar en un micro-

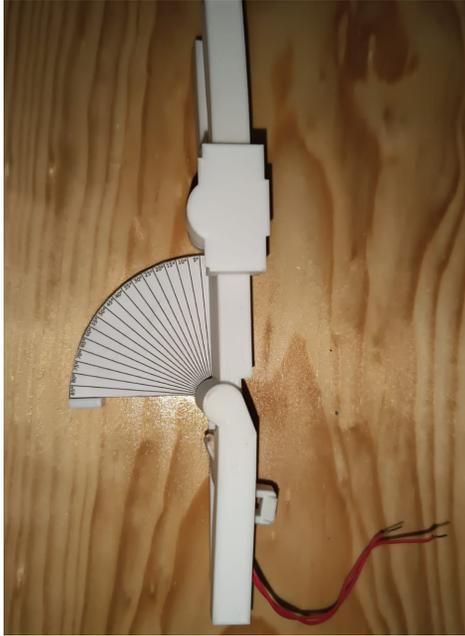


Figura 4.17: $\Theta = 0^\circ$, $\Phi = 0^\circ$.



Figura 4.18: $\Theta = 90^\circ$, $\Phi = 0^\circ$.



Figura 4.19: $\Theta = 0^\circ$, $\Phi = 90^\circ$.

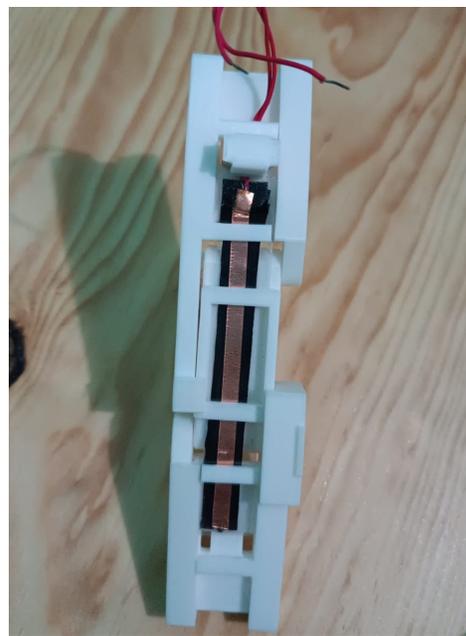


Figura 4.20: Vista superior.

controlador Arduino con limitados recursos[20]. Además este algoritmo, que sirve como un filtro pasa bajas, es muy efectivo reduciendo el ruido de señales analógicas de sensores.

4.8. Consideraciones

4.8.1. Efecto capacitivo del prototipo de sensor

El prototipo de sensor flexible presenta un comportamiento capacitivo debido a su diseño. Las cargas se acumulan en las capas conductoras de cobre, por lo que el valor de la resistencia eléctrica medida varía de un instante de tiempo a otro. Este comportamiento es por supuesto no deseado en el sensor, por lo tanto, es de interés conocer de que manera afecta a la señal producida.

Capítulo 5

Resultados

Los resultados de las mediciones para el prototipo de sensor flexible se discutirán en este capítulo.

Durante la caracterización del sensor se realizaron mediciones indirectas de la resistencia eléctrica utilizando un microcontrolador Arduino Uno R3 para inferir su valor por medio de la relación del divisor de tensión, ver ecuación 5.1. Es posible determinar el valor de la resistencia eléctrica en el sensor(R_2) conociendo el voltaje de entrada, voltaje de salida y el valor de R_1 . Por otra parte, el voltaje de salida(la señal analógica del sensor) se determina mediante la ecuación 5.2. Con ambas ecuaciones se estableció el Óhmetro dentro del Arduino para la toma de muestras de la resistencia eléctrica en el sensor.

$$R_2 = \frac{-V_{out} * R_1}{V_{out} - V_{in}} \quad (5.1)$$

$$V_{out} = ADC \text{ value} * \frac{V_{in}}{2^n - 1} \quad (5.2)$$

donde:

- ADC value: es el valor entero de la señal digitalizada en un instante de tiempo.
- n: es el número de bits del convertidor analógico-digital(ADC).

Además de utilizar el Óhmetro creado en el arduino para facilitar la toma de muestras, se corroboraron las mediciones con un Multímetro digital(MUL-282) marca Steren.

Los resultados referentes a la resistencia eléctrica del prototipo de sensor flexible descrito en este trabajo se observan en las tablas 5.1 y 5.2, mientras que la tabla 5.3 muestra un resistor flexible comercial evaluado bajo las mismas condiciones. A cada sensor se le ha tomado un total de 10 muestras para cada segmento de flexión.

La tabla 5.2 es una recopilación de los valores de resistencia eléctrica en el prototipo teniendo en cuenta el efecto capacitivo que presenta, es decir, los valores de resistencia eléctrica después de que las cargas se acumularan en las capas conductivas. Los valores de este conjunto son de menor magnitud en comparación con los de la tabla 5.1, ya que a medida que las cargas se acumulan en el sensor, la resistencia aumenta.

En la tabla 5.3 se puede observar una relación directamente proporcional entre el ángulo de flexión y la resistencia eléctrica. Por el contrario, la tabla 5.1 describe una relación inversamente proporcional entre ambos parámetros.

La figura 5.1 muestra la señal digital del prototipo de sensor flexible antes y después de procesarla con el filtro de la media móvil exponencial, mientras que la figura 5.2 ilustra la señal de un sensor comercial. Ambas señales fueron adquiridas realizando movimientos de aducción-abducción en los ejes Φ y Θ asociados a las articulaciones metacarpofalángica y proximal-interfalángica de manera simultánea. Dichos movimientos se realizaron colocando los sen-

sores en un guante de prueba para capturar la señal natural de la contracción de un dedo al realizar LSM.

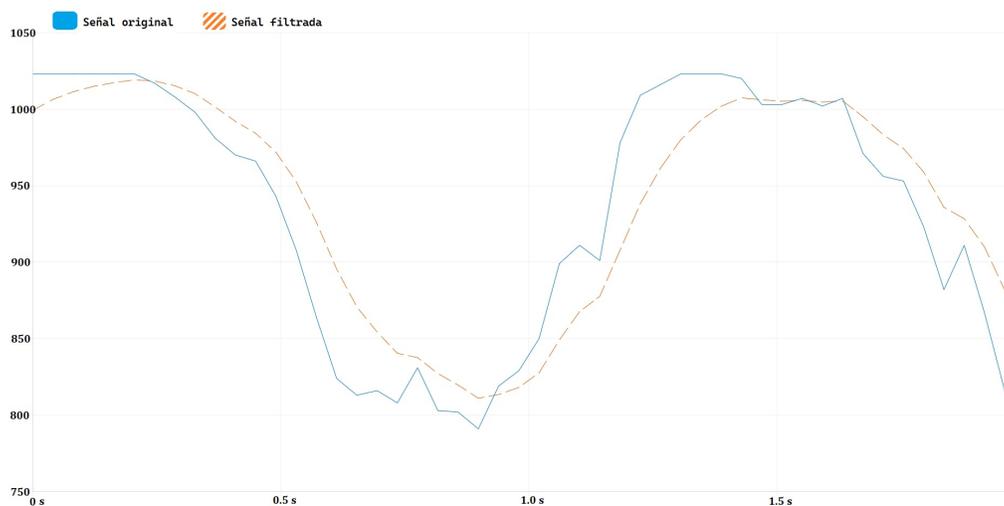


Figura 5.1: Señal del prototipo de sensor flexible(movimientos de aducción-abducción). Azul: señal antes del procesamiento. Naranja: señal filtrada por media móvil exponencial.

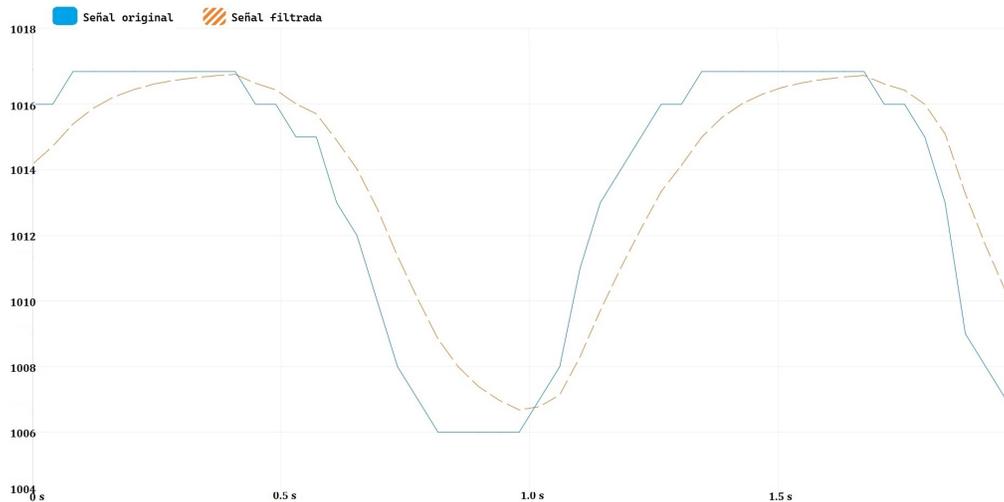


Figura 5.2: Señal de un sensor flexible comercial(movimientos de aducción-abducción). Azul: señal antes del procesamiento. Naranja: señal filtrada por media móvil exponencial.

Las tablas 5.4 y 5.5 son los resultados del análisis estadístico de la tabla 5.1, mientras que las tablas 5.6 y 5.7 muestran el análisis de la tabla 5.2. Estas tablas detallan los resultados de precisión del prototipo mediante elementos estadísticos importantes como la media (\bar{x}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación porcentual (C_v %) relativos a cada ángulo de flexión.

Cuadro 5.1: Resistencia eléctrica del prototipo de sensor flexible (Ω).

$\Theta = 0^\circ - 90^\circ (\Phi = 0^\circ)$																			
n	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
1	291550	145600	6100	2800	6000	1250	850	780	600	500	385	315	280	250	225	200	180	170	160
2	291550	96000	145000	14000	4000	1750	1350	900	800	570	385	355	290	260	240	210	190	175	165
3	291550	291550	291550	7650	4000	1850	1370	930	760	580	445	385	335	220	220	190	195	185	180
4	291550	291550	15000	6000	3650	1300	1250	830	700	600	450	405	355	300	265	235	210	200	190
5	291550	36200	48000	18000	2900	1650	1100	890	785	600	410	375	350	265	240	210	190	188	185
6	291550	32500	48000	13000	3500	1800	1050	990	800	600	440	330	295	265	240	220	190	185	180
7	291550	48000	97000	9700	4150	2500	1750	1200	1050	760	625	485	390	345	310	260	260	240	230
8	291550	36300	21900	9500	4150	1750	1300	900	810	690	460	390	340	260	285	255	200	185	170
9	291550	56500	47800	9000	3410	1860	1290	1	1100	790	405	380	350	275	270	230	195	190	185
10	291550	96200	48000	11000	5100	1790	1200	950	785	595	445	410	340	310	285	235	220	185	195
$\Phi = 0^\circ - 90^\circ (\Theta = 0^\circ)$																			
n	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
1	135000	67000	135000	271000	16900	7200	3000	1700	1200	1100	850	650	550	470	410	355	325	305	285
2	135000	30100	22000	14500	7000	3700	2000	1250	1150	1000	750	520	490	430	380	345	295	280	270
3	291550	112000	49500	20100	9000	5000	1800	1300	1100	1000	650	590	490	410	360	315	280	265	255
4	291550	90100	14800	33100	8200	4100	1900	1050	850	725	530	465	360	325	295	260	225	205	185
5	291550	20100	15300	21500	11700	5850	3400	1650	1150	800	690	635	580	405	380	335	255	245	240
6	291550	48000	55500	30400	14650	7500	2900	1900	1550	900	695	600	550	435	390	340	270	250	245
7	291550	36500	24500	16600	9500	7300	3300	1850	1450	835	680	570	510	380	390	335	260	255	210
8	291550	29800	291550	25200	14100	8900	1900	2400	1700	950	780	690	580	490	440	350	280	235	195
9	291550	48500	36200	18800	13500	8200	3750	2100	1610	1000	880	785	730	560	445	370	280	270	215
10	291550	36200	22500	20100	8350	8350	3875	2750	1800	1050	900	800	760	580	475	385	315	285	230

Cuadro 5.2: Resistencia eléctrica del prototipo de sensor flexible debido al efecto capacitivo (Ω).

$\Theta = 0^\circ - 90^\circ (\Phi = 0^\circ)$																			
n	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
1	291550	97000	5400	2600	3550	1100	800	730	580	465	365	300	265	240	215	190	170	160	150
2	291550	58000	48000	9500	3500	1550	1150	850	720	515	360	335	275	250	230	200	180	165	155
3	291550	291550	291550	5700	3300	1270	1050	820	630	465	380	340	285	195	195	175	165	160	160
4	291550	48000	9000	4200	1800	1150	940	645	555	490	385	330	285	255	235	205	190	175	160
5	36000	16000	20000	9100	2350	1250	930	720	700	510	370	330	295	235	210	185	175	170	165
6	48000	24000	19000	11000	2350	1250	920	820	620	525	380	300	260	245	215	195	175	165	165
7	291550	22000	22000	4600	2950	1550	1150	1050	850	610	520	405	330	290	245	215	220	205	190
8	48000	23900	9100	4600	2900	1410	880	810	680	505	390	330	265	200	210	215	175	160	155
9	56000	22100	20000	4100	2350	1660	1000	850	850	610	365	325	285	210	230	185	180	170	165
10	291550	58000	8900	5800	3300	1340	950	715	615	470	380	350	275	240	245	190	200	160	180

$\Phi = 0^\circ - 90^\circ (\Theta = 0^\circ)$																			
n	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
1	271000	22000	30000	48000	10150	4800	1950	1250	910	810	635	500	440	410	345	305	265	260	250
2	291550	16500	16500	11000	5800	2200	1550	940	890	750	590	435	410	385	320	290	240	235	240
3	291550	24600	22000	16700	7100	4000	1350	1100	850	690	530	490	405	360	310	275	230	225	215
4	30000	22000	10000	9800	5500	2750	1100	700	550	475	370	320	265	235	215	190	180	170	165
5	291550	16800	9800	9300	7400	3550	1680	1150	780	635	555	515	455	390	340	290	215	210	205
6	48000	22000	14600	14100	9750	4100	1870	1000	850	665	540	490	435	350	315	255	220	220	190
7	291550	22000	11900	8400	6900	4850	1950	1200	865	660	510	455	420	325	300	260	215	220	170
8	291550	20400	48000	15800	12700	6700	2400	1330	900	770	605	545	470	395	345	280	235	195	165
9	56000	17400	20500	11900	8100	3950	1900	1300	880	780	635	570	515	445	380	295	225	225	180
10	291550	22500	14100	12500	7300	4700	2050	1450	920	790	650	575	520	430	370	290	245	215	195

Cuadro 5.3: Resistencia eléctrica de un sensor flexible comercial (k Ω).

$\Theta = 0^\circ - 90^\circ (\Phi = 0^\circ)$ unidades en k Ω																			
n	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
1	9	10.1	9.7	10.1	10.1	10.1	10.5	10.5	11	11	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
2	9	9.4	9.7	9.7	10.1	10.1	10.5	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
3	9	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
4	9.4	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
5	9.7	10.1	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
6	9.4	9.4	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
8	9.4	10.1	9.7	10.1	10.1	10.1	10.5	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
9	9.4	9.7	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
10	9.4	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
$\Phi = 0^\circ - 90^\circ (\Theta = 0^\circ)$ unidades en k Ω																			
n	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
1	9.4	9.7	9.7	10.1	10.1	10.1	10.5	10.5	11	11	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
2	9	9.4	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
3	9.7	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
4	9	9.4	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
5	9	9.4	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
6	9.4	9.4	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
7	9.4	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
8	9.4	9.4	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
9	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8
10	9.4	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	11	10.5	11.5	12	12	12.65	13.3	13.3	14	14	14.8

Cuadro 5.4: Precisión del prototipo de sensor flexible (A).

$\Theta = 0^\circ - 90^\circ (\Phi = 0^\circ)$									
ángulo	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
\bar{x}	291550	113040	76835	10065	4086	1750	1251	930	819
σ	0	95432.08	81448.08	4057.84	843.31	324.22	224.39	111.95	141.79
C_v (%)	0	84.42	106.00	40.32	20.64	18.53	17.94	12.04	17.31
$\Phi = 0^\circ - 90^\circ (\Theta = 0^\circ)$									
\bar{x}	260240	51830	66685	47130	11290	6610	2782.5	1795	1356
σ	66007.28	29409.98	86693.64	78876.11	3345.88	1836.48	814.80	528.34	308.62
C_v (%)	25.36	56.74	130.00	167.36	29.64	27.78	29.28	29.43	22.76

Cuadro 5.5: Precisión del prototipo de sensor flexible (B).

$\Theta = 0^\circ - 90^\circ (\Phi = 0^\circ)$									
45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
628.5	445	383	332.5	275	258	224.5	203	190.3	184
85.44	65.35	44.68	32.42	33.24	28.04	21.62	21.82	18.24	18.55
13.59	14.68	11.66	9.75	12.09	10.87	9.63	10.75	9.59	10.08
$\Phi = 0^\circ - 90^\circ (\Theta = 0^\circ)$									
936	740.5	630.5	560	448.5	396.5	339	278.5	259.5	233
118.74	115.14	106.65	116.52	78.71	50.39	33.90	29.06	28.23	32.25
12.69	15.55	16.92	20.81	17.55	12.71	10.00	10.44	10.88	13.84

Cuadro 5.6: Precisión del prototipo de sensor flexible considerando el efecto capacitivo (A).

$\Theta = 0^\circ - 90^\circ (\Phi = 0^\circ)$									
ángulo	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
\bar{x}	193730	53566.67	71594.44	50133.33	11616.67	6416.667	2661.111	1688.889	1306.667
σ	119889.65	28892.67	85292.21	78302.23	3182.42	1731.73	718.71	408.10	266.29
C_v (%)	61.88	53.94	119.13	156.19	27.40	26.99	27.01	24.16	20.38
$\Phi = 0^\circ - 90^\circ (\Theta = 0^\circ)$									
\bar{x}	215430	20620	19740	15750	8070	4160	1780	1142	839.5
σ	118175.28	2768.39	11706.81	11655.54	2203.43	1242.94	372.35	218.16	109.30
C_v (%)	54.86	13.43	59.31	74.00	27.30	29.88	20.92	19.10	13.02

Cuadro 5.7: Precisión del prototipo de sensor flexible considerando el efecto capacitivo (B).

$\Theta = 0^\circ - 90^\circ (\Phi = 0^\circ)$									
45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
923.3333	722.7778	611.6667	537.7778	433.8889	387.7778	333.8889	274.4444	256.6667	233.3333
111.78	100.58	88.47	92.95	63.72	42.17	29.79	26.08	26.77	32.23
12.11	13.92	14.46	17.28	14.69	10.88	8.92	9.50	10.43	13.81
$\Phi = 0^\circ - 90^\circ (\Theta = 0^\circ)$									
702.5	562	489.5	433.5	372.5	324	273	227	217.5	197.5
100.95	83.11	74.92	71.42	60.33	46.12	33.02	22.51	23.72	30.12
14.37	14.79	15.31	16.47	16.20	14.23	12.09	9.92	10.90	15.25

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones

Analizando los resultados de las tablas 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7 se determina que la respuesta del prototipo de sensor flexible no es precisa en comparación con la de un sensor comercial, además su rango de fiabilidad está definido de 20° a 90° tanto para Θ , como para Φ , fuera de este rango la media aritmética deja de ser representativa (su coeficiente de variación es mayor a 30 %) para el conjunto de datos. Consecuentemente, se concluye que el prototipo de sensor flexible presenta indeterminación en los valores de resistencia eléctrica relacionados al intervalo $0^\circ - 15^\circ$, es decir en su posición extendida.

Por otra parte, las similitudes entre las señales de la figura 5.1 y la figura 5.2 permiten concluir que el prototipo descrito en este trabajo podría ser de utilidad en el reconocimiento de la dactilología en LSM debido a que el sensor comercial empleado como control en este trabajo, ya ha sido utilizado anteriormente en otros proyectos de guantes traductores de Lengua de señas de manera exitosa [8].

6.2. Discusión y trabajo futuro

A pesar de que el prototipo de sensor de este trabajo podría aplicarse al reconocimiento de señales en el contexto de la dactilología en una Lengua de Señas, presenta ciertos inconvenientes y aspectos a considerar en el caso de utilizarlo en un *smart glove*.

El primer aspecto a considerar es el efecto capacitivo no deseado que presenta este prototipo, el cual, claramente introduce variaciones en la resistencia eléctrica del sensor debido a la acumulación de cargas al mantener la misma posición a medida que transcurre el tiempo. Esto puede llegar a ser un problema sobretodo cuando la velocidad a la que se realizan las señas es baja y la flexión del sensor varía poco. El problema radica en el diseño propio del sensor, lógicamente la solución sería la elaboración de un prototipo que no dependa de colocar dos placas paralelas de material conductor sobre el material piezoeléctrico para generar la señal.

El segundo inconveniente es la indeterminación de la resistencia eléctrica para ángulos de flexión menores a 20° , lo cual podría llegar a afectar en el porcentaje de señas reconocidas exitosamente. La solución se encuentra nuevamente en la elaboración de un diseño diferente, o un proceso de fabricación modificado que permita tener lecturas consistentes cuando el sensor presenta muy poca flexión mecánica.

Apéndice A

Bibliografía

- [1] Ayuso, M. *inkjet_continuous_diagram*. <https://mariaayuso.wordpress.com/2013/06/14/interiorismo-con-impresion-inkjet/>, 2013. Accessed: 2023-05-04.
- [2] Becerra, R. *Alfabeto de señas mexicano*. <https://www.guiadisc.com/software-alfabeto-senas-mexicano.html>, 2012. Accessed: 2023-05-04.
- [3] Jamie Benson, Chung Man Fung, Jonathan Stephen Lloyd, Davide Deganello, Nathan Andrew Smith, and Kar Seng Teng. Direct patterning of gold nanoparticles using flexographic printing for biosensing applications. *Nanoscale Research Letters*, 10(1), March 2015.
- [4] Manuel Caeiro-Rodríguez, Iván Otero-González, Fernando A Mikic-Fonte, and Martín Llamas-Nistal. A systematic review of commercial smart gloves: Current status and applications. *Sensors*, 21(8):2667, 2021.
- [5] Motao Cao, Woo Jin Hyun, Lorraine F Francis, and C Daniel Frisbie. Inkjet-printed, self-aligned organic schottky diodes on imprinted plastic substrates. *Flexible and Printed Electronics*, 5(1):015006, January 2020.

- [6] Crossfit. *CF_Finger_Abduction_Aduction_v1*. <https://www.crossfit.com/essentials/movement-about-joints-part-4-the-hand-and-fingers>, 2019. Accessed: 2023-05-04.
- [7] Crossfit. *CF_Flexion_Extension_v1*. <https://www.crossfit.com/essentials/movement-about-joints-part-4-the-hand-and-fingers>, 2019. Accessed: 2023-05-04.
- [8] Abhinandan Das, Lavish Yadav, Mayank Singhal, Raman Sachan, Hemang Goyal, Keshav Taparia, Raghav Gulati, Ankit Singh, and Gaurav Trivedi. Smart glove for sign language communications. In *2016 International Conference on Accessibility to Digital World (ICADW)*. IEEE, December 2016.
- [9] Desconocido. *Números Señas México V16*. https://www.escuelaparasordos.com/resources/lsm/numeros_se%C3%B1as_mexico_v16.jpg, 2023. Accessed: 2023-05-04.
- [10] Engineering ToolBox. *AWG - American Wire Gauge Current Ratings*. https://www.engineeringtoolbox.com/wire-gauges-d_419.html, 2003. Accessed: 2023-05-15.
- [11] Ali Eshkeiti, Avuthu S. G. Reddy, Sepehr Emamian, Binu B. Narakathu, Michael Joyce, Margaret Joyce, Paul D. Fleming, Bradley J. Bazuin, and Massood Z. Atashbar. Screen printing of multilayered hybrid printed circuit boards on different substrates. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 5(3):415–421, March 2015.
- [12] Franciasco Javier Tormo García, Juan Ivorra Martínez, Teodomiro Boronat, and Nestor Montañes Muñoz. Low-cost fabrication and character-

- risation of a flexible graphite-based touch sensor. *DYNA*, 98(2):136–140, March 2023.
- [13] INEGI. *Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica 2018, presentación de resultados1*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enadid/2018/doc/re\\sultados_enadid18.pdf, 2018. Accessed: 2023-04-27.
- [14] Junaidi, K Triyana, Harsojo, and E Suharyadi. High-performance silver nanowire film on flexible substrate prepared by meyer-rod coating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 202:012055, May 2017.
- [15] Dinesh Maddipatla, Binu B. Narakathu, and Massood Atashbar. Recent progress in manufacturing techniques of printed and flexible sensors: A review. *Biosensors*, 10(12):199, Dec 2020.
- [16] A. Mayeen and N. Kalarikkal. Development of ceramic-controlled piezoelectric devices for biomedical applications. In *Fundamental Biomaterials: Ceramics*, pages 47–62. Elsevier, 2018.
- [17] A.S.G. Reddy, B.B. Narakathu, M.Z. Atashbar, M. Rebros, E. Rebrosova, and M.K. Joyce. Fully printed flexible humidity sensor. *Procedia Engineering*, 25:120–123, 2011.
- [18] Giovanni Saggio and Giancarlo Orengo. Flex sensor characterization against shape and curvature changes. *Sensors and Actuators A: Physical*, 273:221–231, April 2018.

- [19] C.E. Garrido Varas and T.J.U. Thompson. Metric dimensions of the proximal phalanges of the human hand and their relationship to side, position, and asymmetry. *HOMO*, 62(2):126–143, April 2011.
- [20] Alan Richard Wilson. Event triggered analog data acquisition using the exponential moving average. *IEEE Sensors Journal*, 14(6):2048–2055, June 2014.



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FORMA T-4
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR

Cuernavaca, Mor., a 22 de junio del 2023

DR. OUTMANE OUBRAM
DR. MARIO LIMÓN MENDOZA
DR. JOSÉ GERARDO VERA DIMAS
DR. ZAKARYAA ZARHRI
DR. JOSE GUADALUPE VELÁSQUEZ AGUILAR
P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de: **TESIS**

Titulado:

**Caracterización de un prototipo de un sensor Flex aplicado al
reconocimiento de la dactilología en Lengua de Señas Mexicana**

Que presenta el **c. LUIS GUILLERMO MACIAS ROJAS**, del programa educativo de **INGENIERÍA ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA**, el cual tiene como director de Tesis al **DR. OUTMANE OUBRAM**.

ATENTAMENTE
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

Se anexa firma electrónica

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE	FIRMA
Aprobatorio	DR. OUTMANE OUBRAM	
Aprobatorio	DR. MARIO LIMÓN MENDOZA	
Aprobatorio	DR. JOSÉ GERARDO VERA DIMAS	
Aprobatorio	DR. ZAKARYAA ZARHRI	
Aprobatorio	DR. JOSE GUADALUPE VELÁSQUEZ AGUILAR	

El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas en las cuales se indica la fecha y hora de la autorización.

VALH/fjbg



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2023-06-23 14:51:10 | Firmante

CZETzLp1Wze92NuGHS3vIusQQVRcsnc9F2Lyh1nziWvhopKQ09h3bVsaQp8Z9WHhbcFNy7/TAKvNj/WS+zJgRAEgrjNfjMCMLQHqPN1tHIUZvTDyFChyUfd4CU1LgweST44cYwsKqrMdo+2L2x0dbliqdben0P/dkiAu22IV2ELYBqsfqg+Z60CeYbIBVQEuzAVOTqW6Je9q/KTRrpfQpl6ymIP9+8ZlouU/esOTMNoXjXs7xnY1gha7YISemAL0ZeUmxcpvel8TI5SWVnbsXg8YOO+bCOZ/fONulg9TnyCG/MHIN5mGAWSBQ0HVY3xGkFbDtSKIsiVqmj5930A==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[qzuOBvngX](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/mSK2z978Pjkh4FAs6IRKV6fg0QE4ZXYI>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

OUTMANE OUBRAM | Fecha:2023-06-23 15:37:18 | Firmante

pco3tw1eULbjcTgaLUWLGQGVA3/NWCknzGmQWxdkDYMsV+VgSCrI8N5aUvG+8z1sl4gf9zrJEYkoAwkOaNHfznAhtgMxEEfUSPWEIRQg4H7jW29rHx7uXDaWNWWWH5zx4D01NN1WNnwPdTnLswol/V9Y02VLMGEnRQ0dYS8dbeo2WdSnhXojX6FPto/j/ib5RgVWY4MAkmhql07j1Vr6a2s+RRZB6qD2rAlu5XdKBsFgQH3FAxCrWdIWkC7Onlq5Xvr8wjs2luYK6Ofwy1Hj3s5nHZzRYuXcmBB95vcrWVN8K5/kTsyJMCUyi0ze4griNEPI dip/WsQEBv9VliT4A==

JOSE GERARDO VERA DIMAS | Fecha:2023-06-23 15:43:50 | Firmante

ng84c2eQ/57Y2ln9MXY8amLKvn4qD1BNqPhMYQYcnMbXAWZlwp/ZsRW69SH/yPkWES5yX1LTjs1cnM0Wa9qSJKMaUC4/itjyNU4zp1G6HrC/oLRig+HO/Aq/4dLHGMChzl/9TjpGjif7f0ZMrWl0UCgSKOExFfg32jiRllruqKnESFvgnRBUgC2rLckjWE0Hx3e5RyEon7X2kzHDNhzSfz+2mXbBKXSqTysK4jRP1u9pde2bvAK5zggHSdLPvTcJ4lrW0BvWkIquPa7VUqWMW6vzG0R0DQemat9vhjzqXj45MJCwid0lpYOBcAX4isLXE5E7iqLH31FpkydsTw==

J GUADALUPE VELASQUEZ AGUILAR | Fecha:2023-06-23 15:48:32 | Firmante

QPvdG+vYdifSgb1dGXFYEG8e1FS0KNyO3DJm7cxw3QQgsu4RspmvmtLISkbYs843/hav/CUjUdBUeSuGuGiydm0fjr0JxcahFF09OrWAEzoj/2+ILyb4d0XwZuXRLbJ6RhBuxOjJxm6FabGYjFK6tbFhbulFMhEN4c71eHSR/1qGX6wspKC4Vtuj7oiebJuDR776fTLvY28/xzVKEtY60am3SvzfxUIDYio3N8F6g002IUUX4bEpTcehp6mc3DTzfeva4ZZ7reyIWARxQTUcxHBzuU1F4FgUnkd7dtkNjKk1rj+4ZtQokQMNRFHFA/fh8h+MPUI3SKLG90MB2mw==

ZAKARYAA ZARHRI | Fecha:2023-06-23 15:48:51 | Firmante

q6esdQfxR36K8f2euEXYKGI/z9Rt24H/BuXhd4P0WsA8vbrLuB2xX/Xes+mqXHMUN3k8iPvjN2HjgZhoPnbt4RvtGvLWoa9SnQsl6V6hWMMR7BZKeMLbWDaWWZKnYeK8ld+Qhx2yiXAzwACRSL04oacBZt5XhNZCwsMtNa0H3IGcdvzFtbF+mT2KL/Gu9wizUzq3VciMEMQs9Zov/XIMdzjflbQFnMZQBYmJo/EQ4iO6hiB6/7LqLd19ZhDjM4gaaheS0E3PknwK68o/6U5F7K084Rqra2mskKoevZofhVKla1u9GjDiONXeit8KEuB3zp7wnpY0hKZp728xFTI3g==

MARIO LIMON MENDOZA | Fecha:2023-06-23 16:04:35 | Firmante

ZOG0J3RlWuLbT9scw2S6ZIRdOrd/HpkzLCgvg32LJlxuxTLPzwmjmbFJ1TaQXeiSmGDFgVie4vRnlibkBKt2BP9cCeLIM13mhl7tefO131oxnUanGj0Bm1ROIqV/oBQboxB3QPR1AFxrYxueDjyvv+DP7ZJ8iyiFkSpeXd5S2ttPv9caKfHP+LdDqGEnkD0i97XX+tc+u8z38v911JwQmueAb6Ac42jT5Kpp1PNfaTKrEj52WQL2T10oDPR+ZHSzVvxLX7qzm2oLmR+vHgdReAuspnt+DvnCtaWULcQEbNtNNe4a7rfx9maUUsz1OSG+fNdUikRoatjZxx2OYx2oQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



CIYLrZgmM

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/0esAzt7oRdwjnyFVogTibYqPSRIT3uv9>

