

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

GUANTE DE DATOS MEDIANTE SENSORES DE FLEXIÓN ELABORADOS CON VELOSTAT



Grado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Trabajo Fin de Grado

David González Guembe

Asier Marzo Pérez

Pamplona, 31 de enero de 2020

RESUMEN

El principal objetivo de este proyecto es desarrollar un prototipo de sensor flexible y de bajo coste para fabricar un guante de datos. Para llevarlo a cabo se estudiará el uso de un material conductor denominado *Velostat*. El *Velostat* o *Linqstat* es un material que varía de resistencia al recibir esfuerzos externos. Es barato y fácil de adaptar a cualquier forma.

Una vez estudiada la viabilidad del material como sensor flexible, se integrará en un guante para crear un guante de datos funcional. En esta etapa se analizará la mejor forma para recolectar los datos de los sensores.

Como última parte, para llegar a un producto final y funcional se construirá una mano robótica que replicará el movimiento del guante de datos.

ABSTRACT

The main objective of this project is to develop a flexible, low-cost sensor prototype for manufacturing a data glove. To carry out this project, the use of a conductive material called *Velostat* will be studied. The *Velostat* or *Linqstat* is a material that varies in resistance when it receives external forces. It is cheap and easy to adapt to any shape.

Once the viability of the material as a flexible sensor has been studied, it will be integrated into a glove to make a functional data glove. At this stage the best way to collect the data from the sensors will be analysed.

As a last part, to reach a final and functional product, a robotic hand will be built to replicate the movement of the data glove.

LABURPENA

Proiektu honen helbururik nagusia, sentsore malgu eta merke bat sortzea da datu-eskularru batean erabiltzeko. Hau burutzeko *Velostat* deritzon material eroale baten ezaugarriak aztertuko dira. Material hau bere erresistentzia aldatzen du kanpoko esfortzuen arabera. Merkea da eta edozein formatara moldatu daiteke.

Behin berretsita material honen erabilkortasuna halako funtzioetan, eskularru batean ezarriko da datu-eskularru bat eratzeeko. Alderdi honetan sentsoreen datu bilakaerarik eraginkorrena bilatuko da.

Azken partez, esku robotiko bat sortuko da zein eskularruaren mugimenduak errepikatuko ditu.

Índice

INTRODUCCIÓN	7
OBJETIVO	7
PARTE 1: SENSORES.....	9
1. SENSORES EN LA ACTUALIDAD.....	9
2. SENSORES COMERCIALES DE FLEXIÓN	9
3. VELOSTAT/LINQSTAT.....	10
4. DESARROLLO DEL SENSOR	10
5. ENSAYOS REALIZADOS.....	12
A. Ensayos de peso	12
B. Ensayos de flexión	18
6. PROPUESTA DE SENSOR	22
7. OTROS ESTUDIOS REALIZADOS	23
A. Fibra.....	23
B. Grafito como conductor	23
PARTE 2: GUANTE DE DATOS	25
1. ADAPTACIÓN DE GUANTE	25
2. DIVISOR DE TENSIÓN.....	29
PARTE 3: LECTURA Y ENVÍO DE DATOS	31
1. ELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR	31
1.1. PIC.....	31
1.2. ARDUINO	32
1.3. ESP8266.....	32
1.4. ESP32.....	32
2. ESP32 DevKitC	32
3. CONECTIVIDAD INALÁMBRICA	33
3.1. WiFi.....	33
3.2. Bluetooth.....	33
3.3. BLE.....	34
4. ALIMENTACIÓN	34
PARTE 4: MANO ROBÓTICA.....	35
1. ESP32.....	35
2. ACTUADOR	36
MANO ROBÓTICA.....	36
SERVOMOTOR	37

3. RESUMEN DE LA PROPUESTA.....	38
PARTE 5: CONCLUSIONES.....	39
1. LÍNEAS FUTURAS	39
2. BIBLIOGRAFÍA.....	40
3. ANEXOS	41
Ensayo de peso con área de sensor de 6'25 cm ²	41
Ensayo de peso con área de sensor de 12'25 cm ²	42
Ensayo de peso con área de sensor de 22'25 cm ²	43
Ensayo de flexión [comercial- <i>Velostat</i>].....	44
Ensayo de flexión [<i>Velostat</i>].....	45

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los guantes de datos son capaces de sensar la flexión de los dedos y permiten interactuar en entornos de realidad virtual o controlar actuadores como manos robóticas remotamente.

Estos guantes tienen un coste elevado y no es un producto que se comercialice al público general. La mayoría de estos guantes usan sensores de flexión/presión FSR que cambian de resistencia al ser doblado o apretados por los movimientos de la mano. Estos sensores son relativamente caros, poco flexibles y presentan dificultades a la hora de intentar adaptar formas más o menos complejas, por lo que su uso no es ideal para la medición de movimientos en cualquier articulación.

OBJETIVO

El principal objetivo de este proyecto es desarrollar un prototipo de sensor flexible y de bajo coste para fabricar un guante de datos. Para llevarlo a cabo se estudiará el uso de un material conductor denominado *Velostat*. El *Velostat* o *Linqstat* es un material que varía de resistencia al recibir esfuerzos externos. Es barato y fácil de adaptar a cualquier forma.

Una vez estudiada la viabilidad del material como sensor flexible, se integrará en un guante para fabricar un guante de datos funcional. En esta etapa se analizará la mejor forma para recolectar los datos de los sensores.

Como última parte, para llegar a un producto final y funcional se fabricará una mano robótica que replicará el movimiento del guante de datos.

PARTE 1: SENSORES

1. SENSORES EN LA ACTUALIDAD

Hoy en día el ser humano vive rodeado de sensores en todo momento y a toda hora. Sin ser conscientes a diario obtenemos información gracias a ellos, desde la previsión meteorológica, hasta la actividad física desarrollada a lo largo del día. Es incuestionable su importancia en la actualidad y que en un futuro estarán más presentes. Con el aumento de sensores, crece la cantidad de datos obtenidos; el análisis de la recopilación de todos los datos es una de las áreas que más está evolucionando en los últimos años y lo seguirá haciendo durante los años venideros.

2. SENSORES COMERCIALES DE FLEXIÓN

Los sensores de flexión se comercializan en limitadas dimensiones y encapsulados en un plástico rígido, lo que delimita su máxima flexión. Al no existir gran variedad de tamaños ni de formas, su implementación en entornos reales.

Estos sensores vienen presentados en un plástico rígido, lo cual delimita la máxima flexión. No existe gran variedad de tamaño ni de formas, por lo que su implementación en entornos reales es limitada a las formas comercializadas.

El rango de flexión está limitado a unos 90° debido a la rigidez del plástico en el que viene presentado el producto. Tienen una respuesta muy lineal, pero su variación de resistividad es menor que la obtenida en los ensayos elaborados con *Velostat*.

3. VELOSTAT/LINQSTAT

El *Velostat* o *Linqstat* es una fina lámina polimérica empleada como protección contra descargas electroestáticas. Su conductividad eléctrica viene dada por un nanomaterial llamado negro de carbón, proveniente de la combustión incompleta de los productos derivados del petróleo.

Se trata de un material piezorresistivo, esta propiedad hace que su resistencia eléctrica varíe en función de los esfuerzos mecánicos que recibe. En el caso de materiales conductores esta variación es debida a la variación de la distancia interatómica mientras que, en los materiales semiconductores, como el caso que nos ocupa en este proyecto, es debida a la variación de la concentración de portadores, en otras palabras, de los huecos producidos por la falta de electrones. Se estudiarán las relaciones de compresión-resistividad y flexión-resistividad para conocer el desempeño de este material frente al estrés mecánico.

Al ejercer una fuerza externa sobre el sensor de *Velostat* su resistividad disminuye.

A diferencia de la piezoelectricidad, la piezorresistividad no produce una diferencia de potencial, por lo que su uso como actuadores queda descartado.

4. DESARROLLO DEL SENSOR

En este apartado se estudiará la mejor forma de fabricar un sensor con el material propuesto. Se realizarán estudios de flexión [midiendo el ángulo al que se somete al sensor frente a la tensión obtenida en un divisor de tensión con una resistencia fija conocida] y de presión [aplicando un peso conocido sobre la superficie del material frente a la tensión obtenida en un divisor de tensión].

Al tratarse de una resistencia variable, la forma más directa de integrarla en un circuito real es mediante un divisor de tensión con una resistencia de valor fijo y conocido. El valor de esta resistencia se elegirá para que sea óptimo y de esta forma se aproveche al máximo el rango de tensión.

Se ha analizado el comportamiento del sensor al variar el número de capas de *Velostat*, y la superficie de este.

El circuito implementado para la realización de los ensayos es un divisor de tensión alimentado mediante el ESP32 a 3.3 V y el parámetro medido es la tensión a la salida de la resistencia de valor fijo. Con la medida de la tensión, conociendo la tensión de alimentación y el valor de la resistencia que finaliza el divisor de tensión se puede calcular la resistencia del sensor en los puntos estudiados.

Al analizar los datos de resistividad obtenidos y graficarlos se observó que la tendencia no es lineal, característica deseable cuando se acondiciona un sensor. Sin embargo, la

conductividad muestra una respuesta lineal, por lo que a partir de este momento se trabajará con este valor para mayor comodidad y facilidad. La conductividad es la medida inversa a la resistividad y su unidad es el siemens por metro.



Ilustración 1: Prototipo de sensor con Velostat



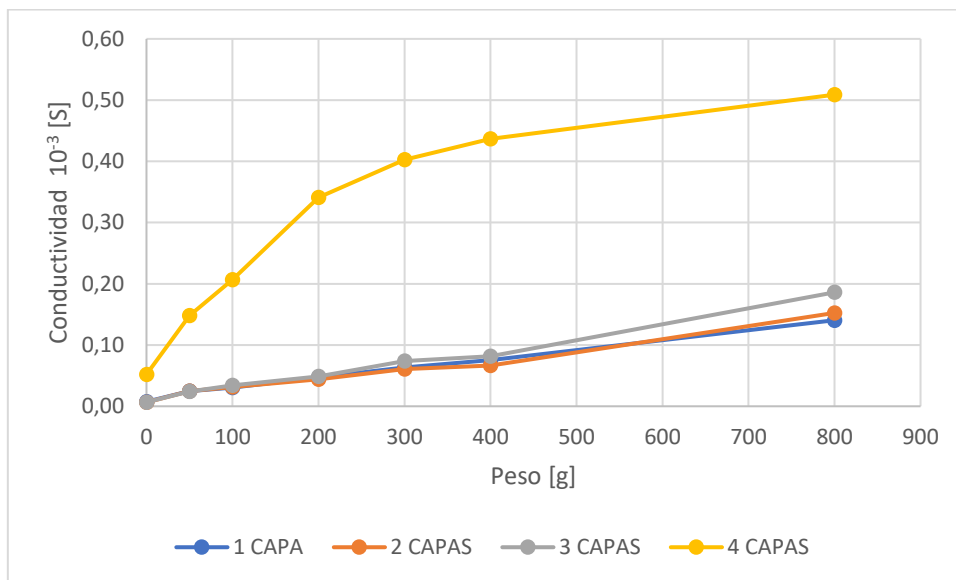
Ilustración 2: Sensor de flexión comercial

5. ENSAYOS REALIZADOS

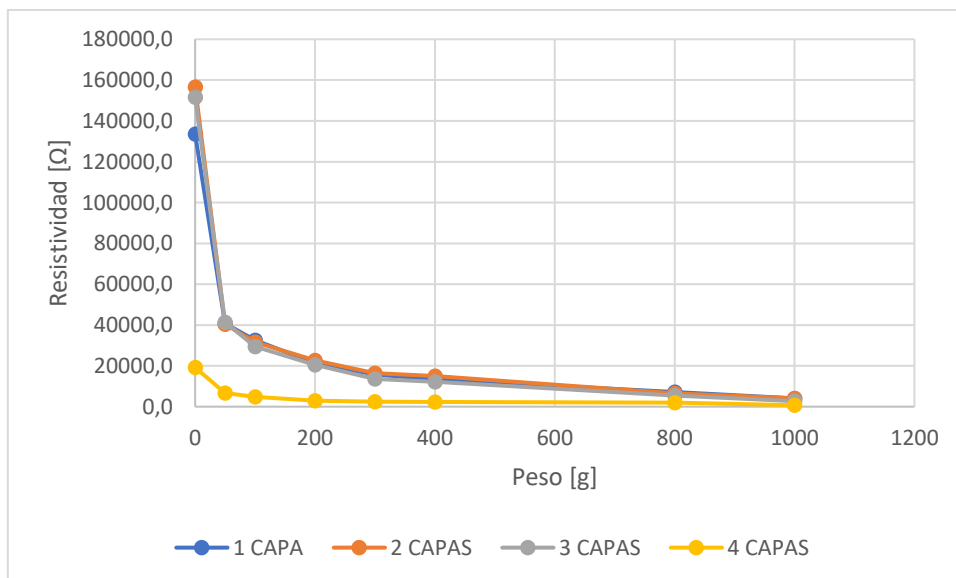
Tras realizar los ensayos se ha observado el comportamiento de la resistividad al añadir capas de material. Con una o dos capas de *Velostat* las mediciones eran más variables, al emplear tres capas, con el aumento de resistividad inicial asociado, las mediciones eran más fiables.

A. Ensayos de peso

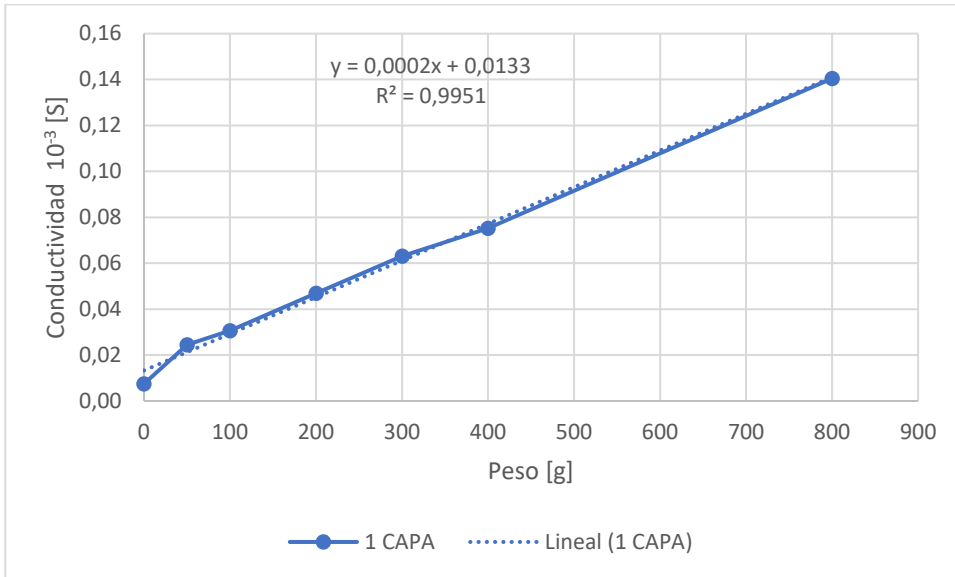
- $\text{Área} = 6'25 \text{ cm}^2$



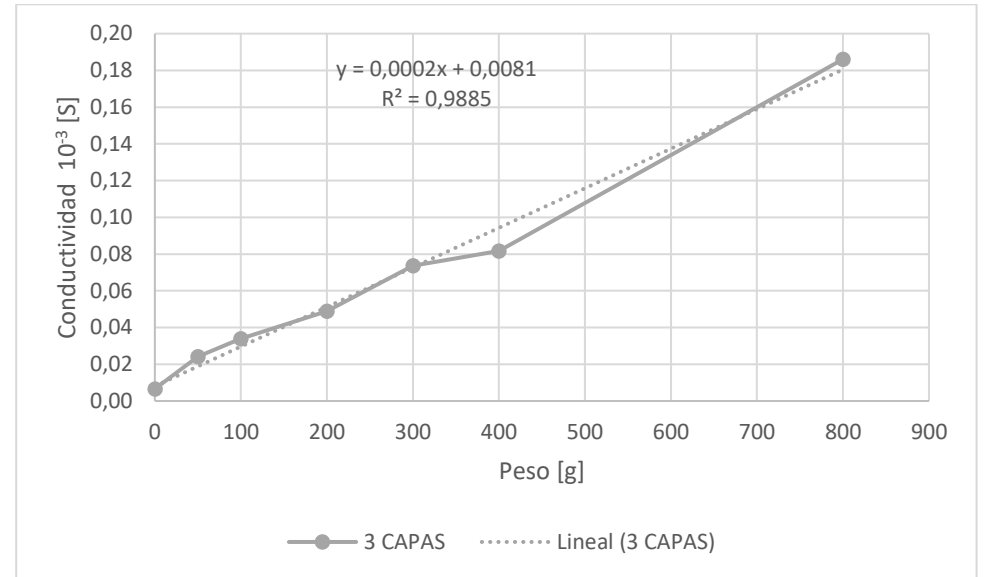
Gráfica 1: Conductividad frente peso



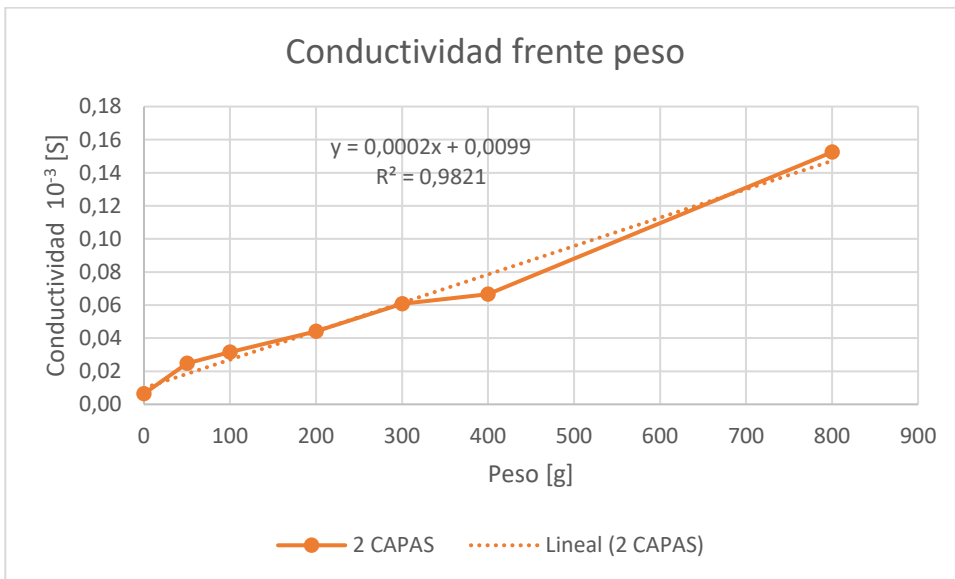
Gráfica 2: Resistividad frente peso



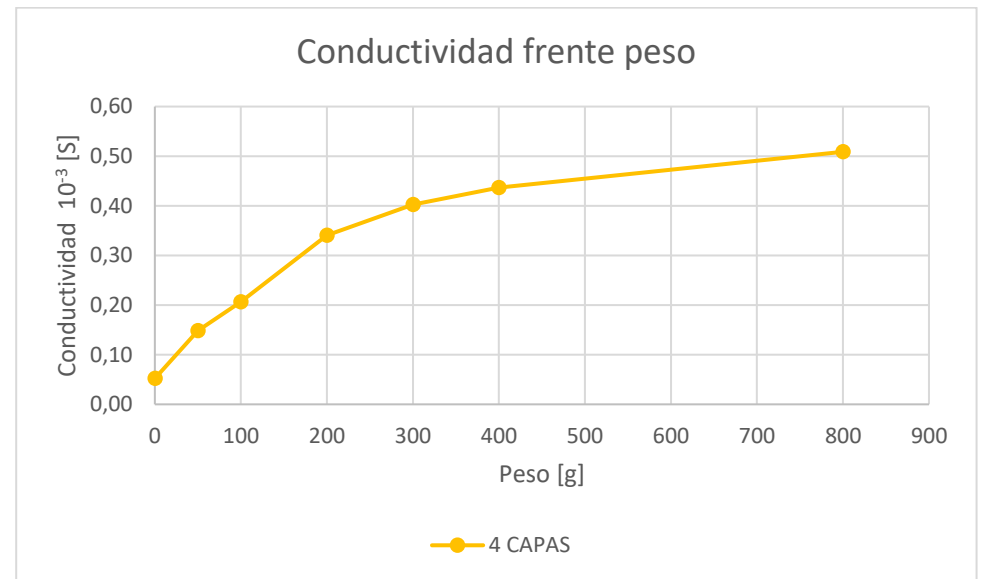
Gráfica 3: Conductividad frente peso [1 capa]



Gráfica 5: Conductividad frente peso [3 capas]

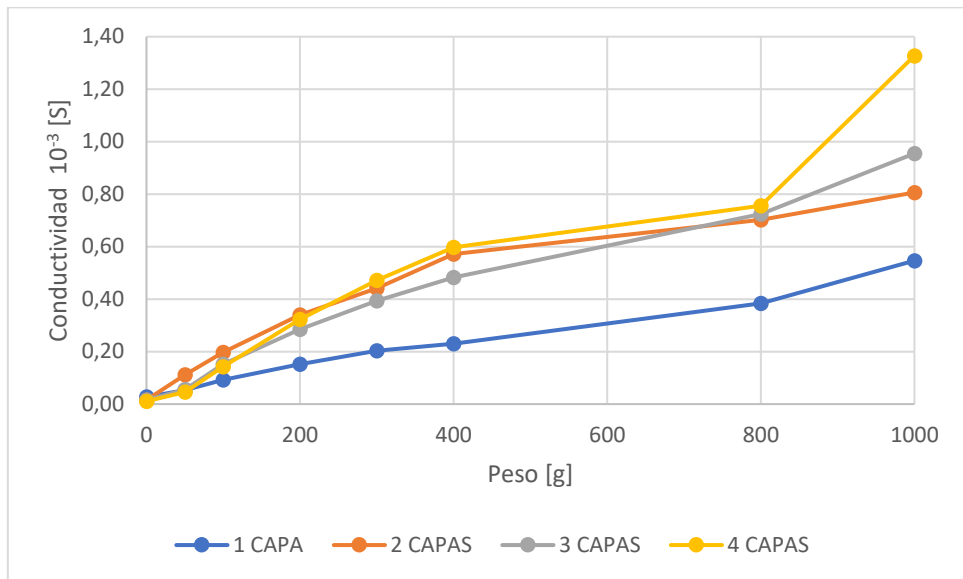


Gráfica 4: Conductividad frente peso [2 capas]

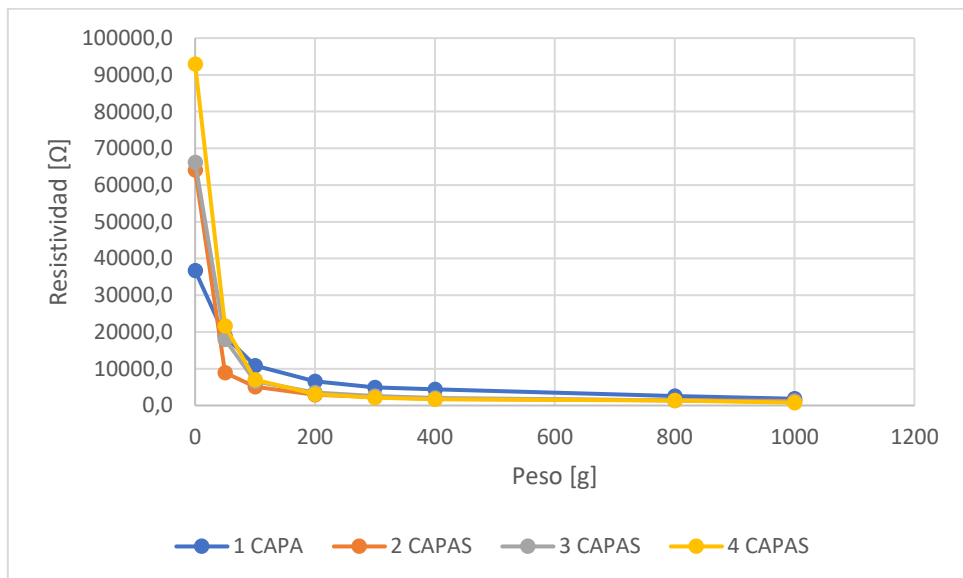


Gráfica 6: Conductividad frente peso [4 capas]

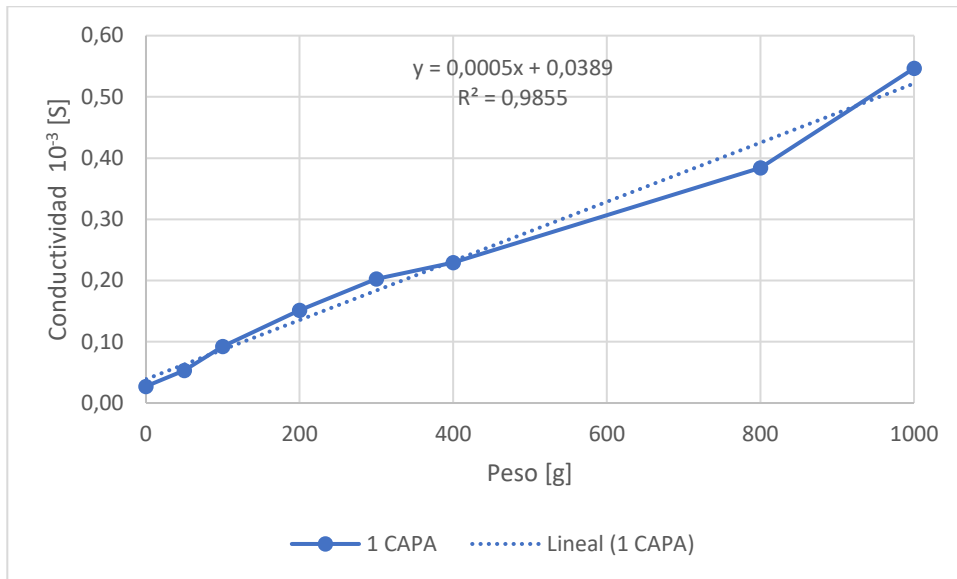
- Área = 12'25 cm²



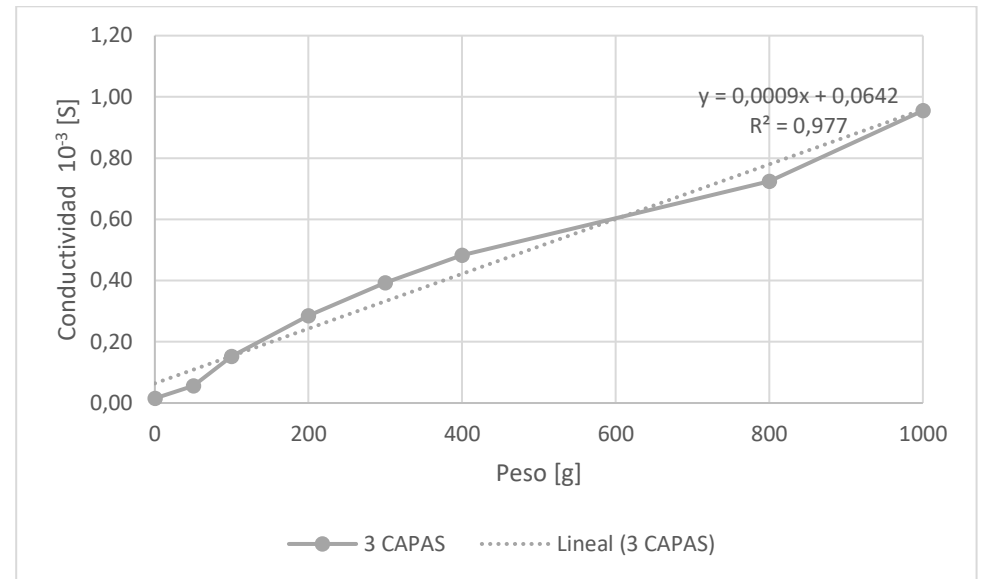
Gráfica 7: Conductividad frente peso



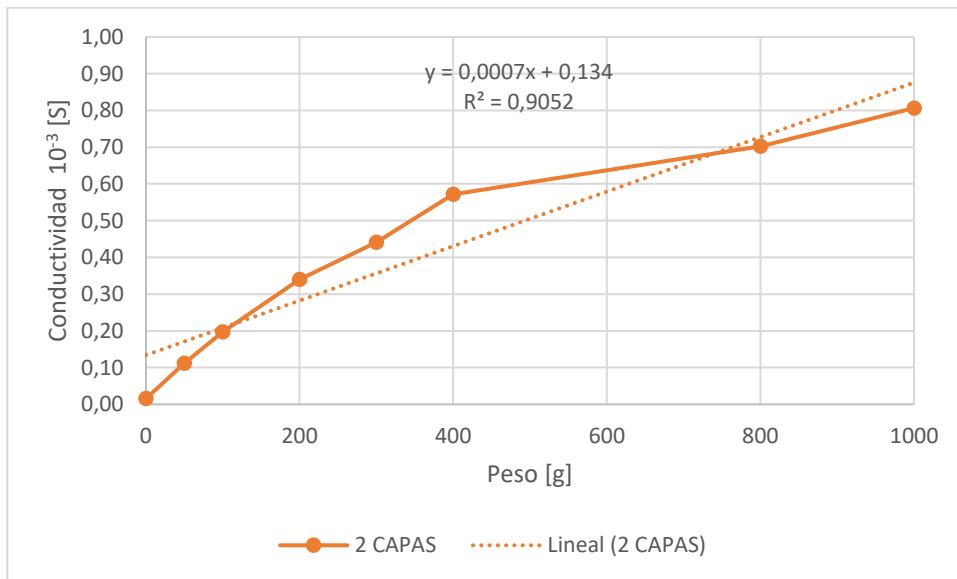
Gráfica 8: Resistividad frente peso



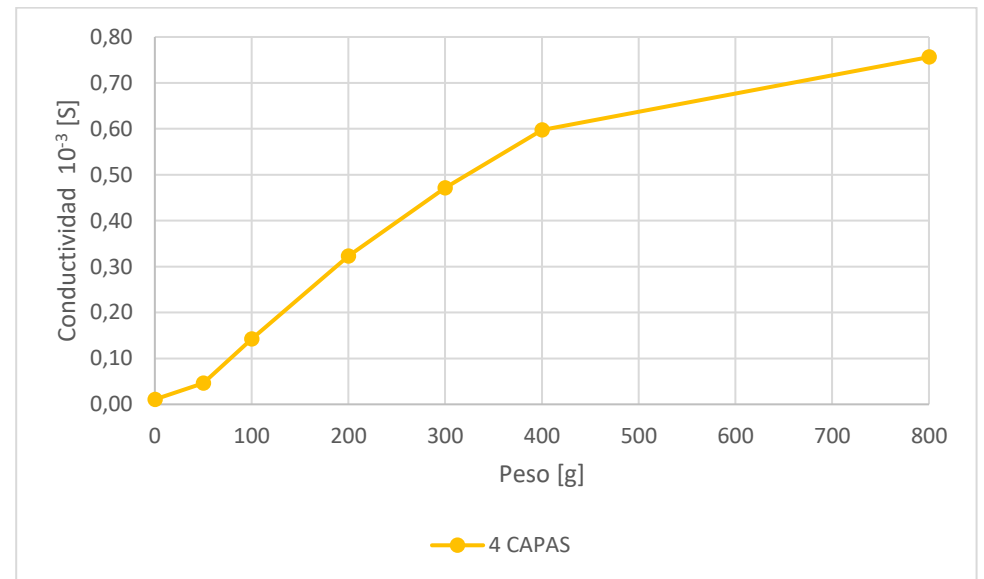
Gráfica 9: Conductividad frente peso [1 capa]



Gráfica 11: Conductividad frente peso [3 capas]

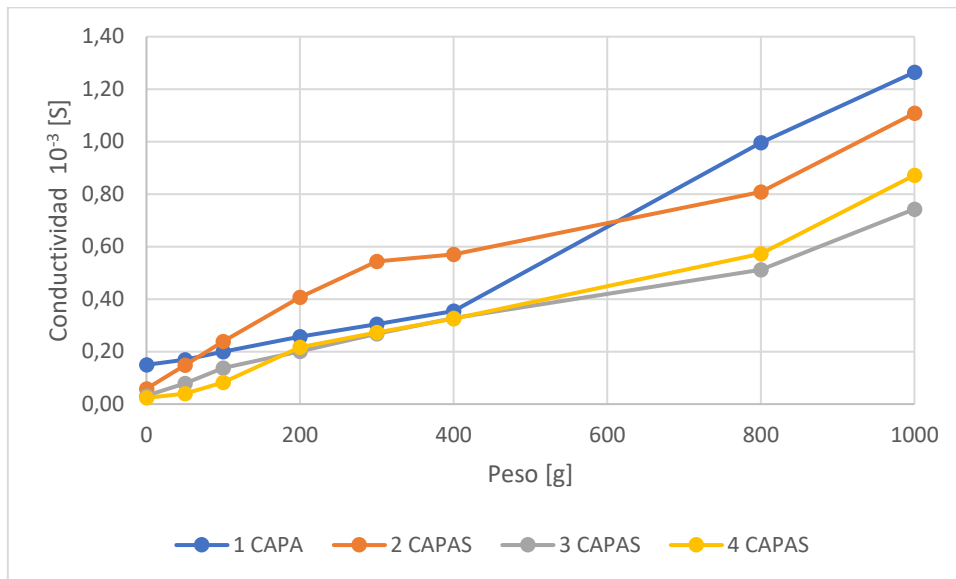


Gráfica 10: Conductividad frente peso [2 capas]

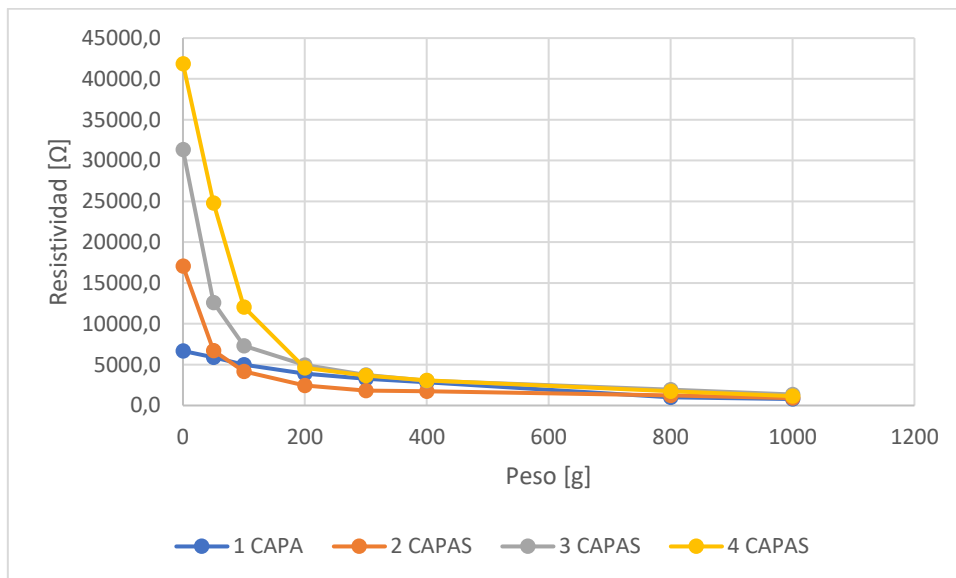


Gráfica 12: Conductividad frente peso [4 capas]

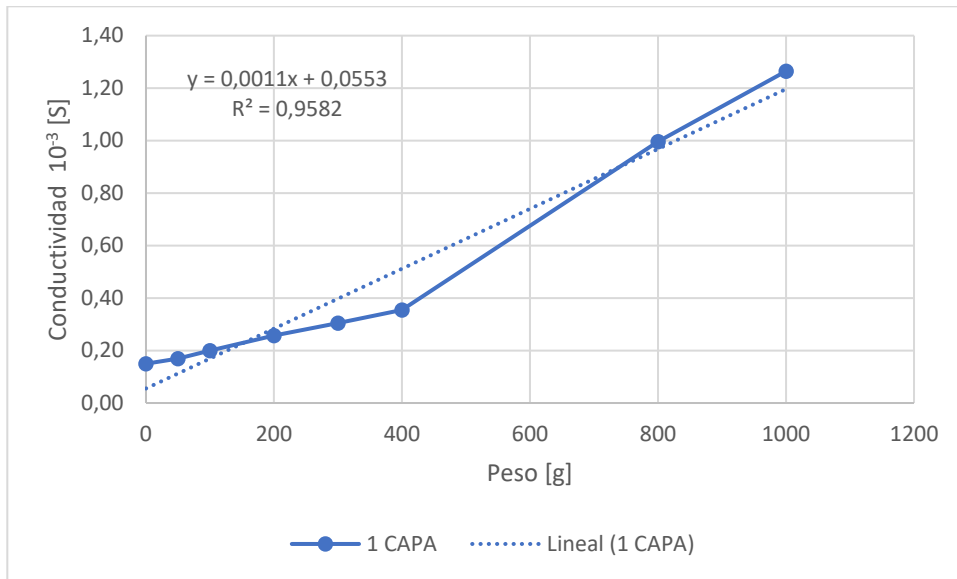
- Área = 20'25 cm²



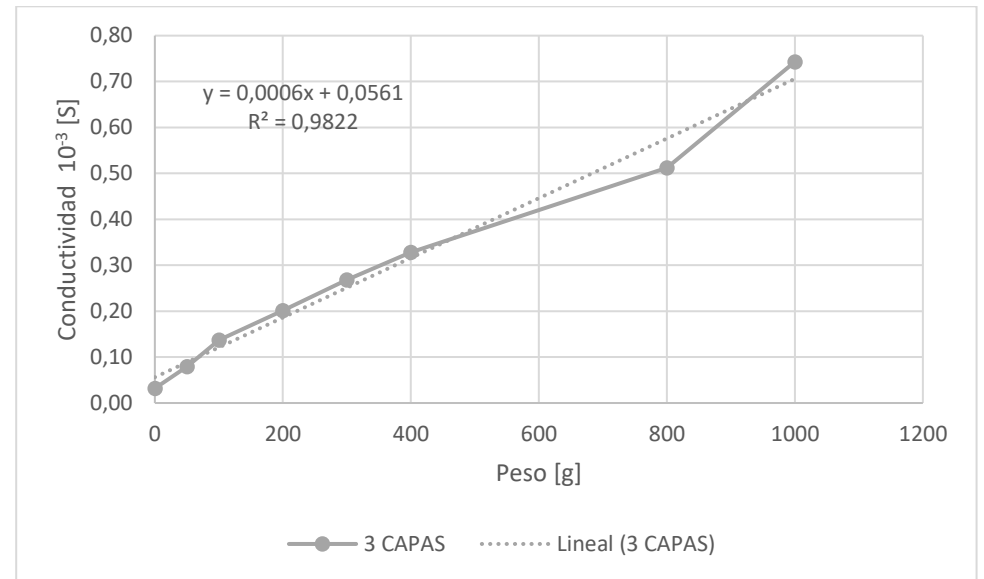
Gráfica 13: Conductividad frente peso



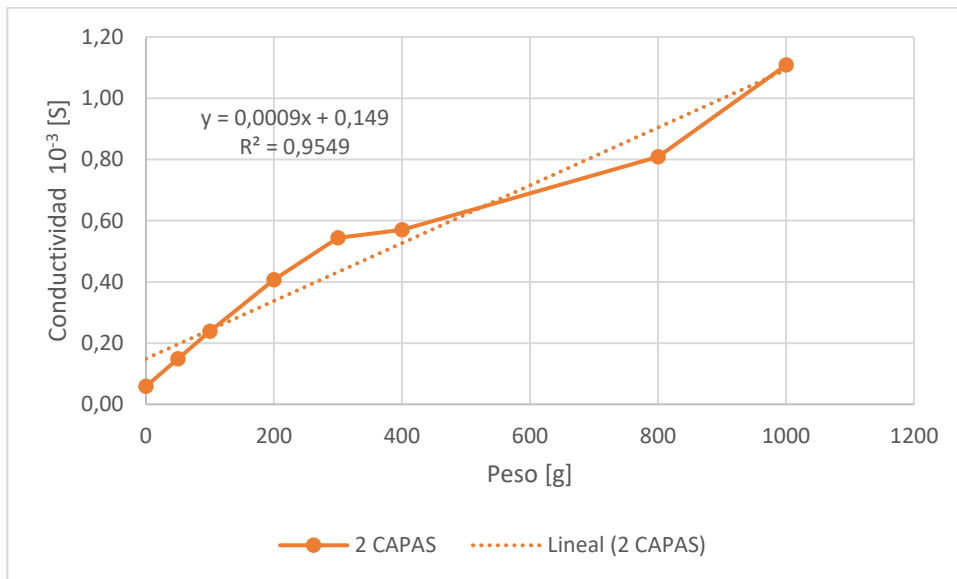
Gráfica 14: Resistividad frente peso



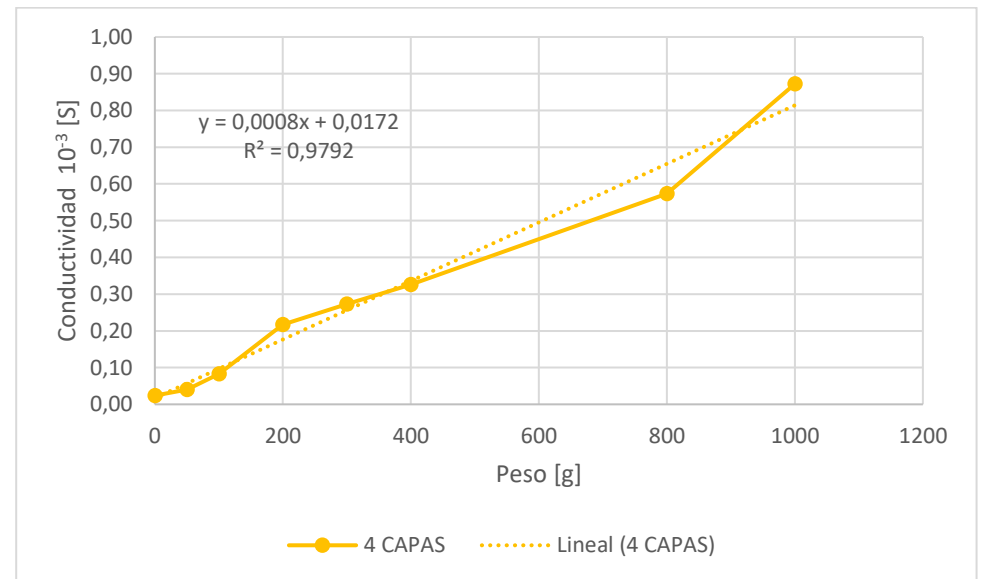
Gráfica 15: Conductividad frente peso [1 capa]



Gráfica 17: Conductividad frente peso [3 capas]



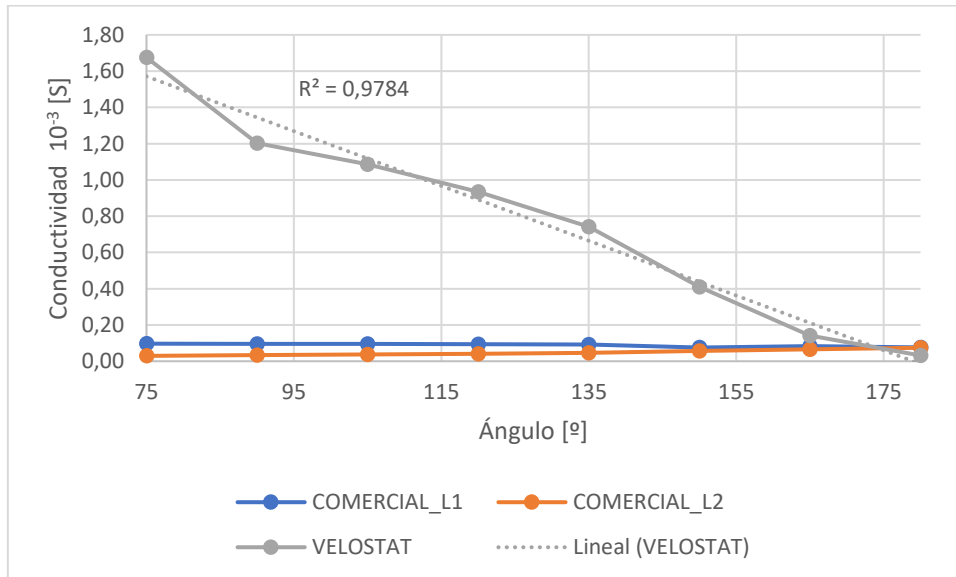
Gráfica 16: Conductividad frente peso [2 capas]



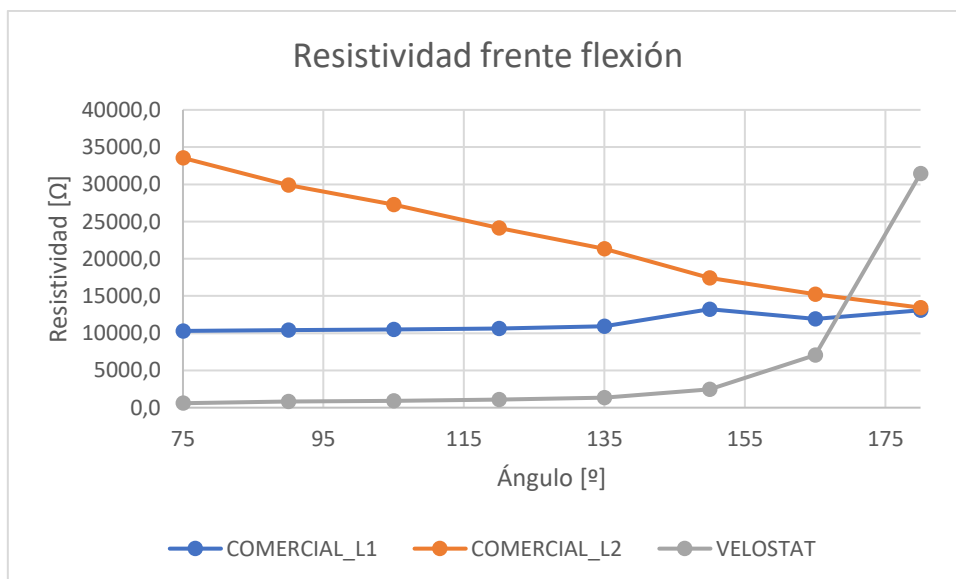
Gráfica 18: Conductividad frente peso [4 capas]

B. Ensayos de flexión

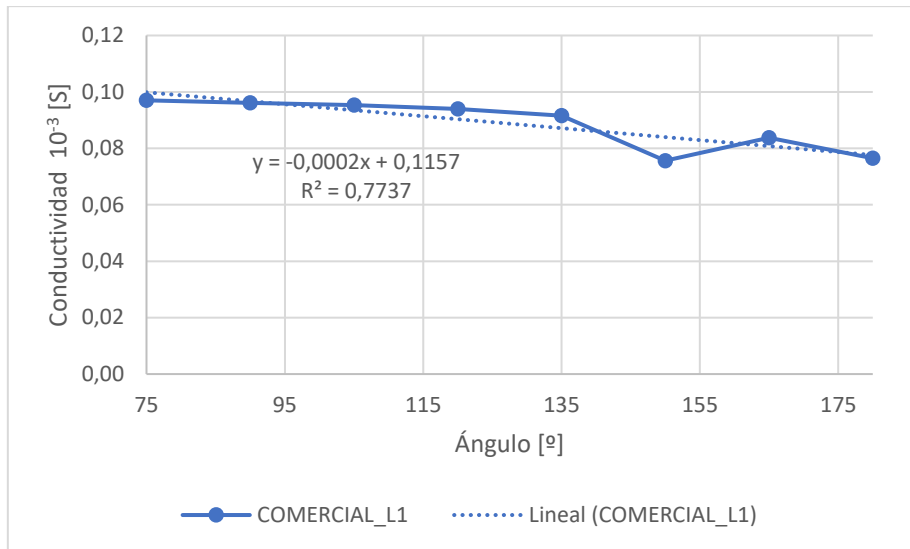
- *Sensor comercial y sensor Velostat*



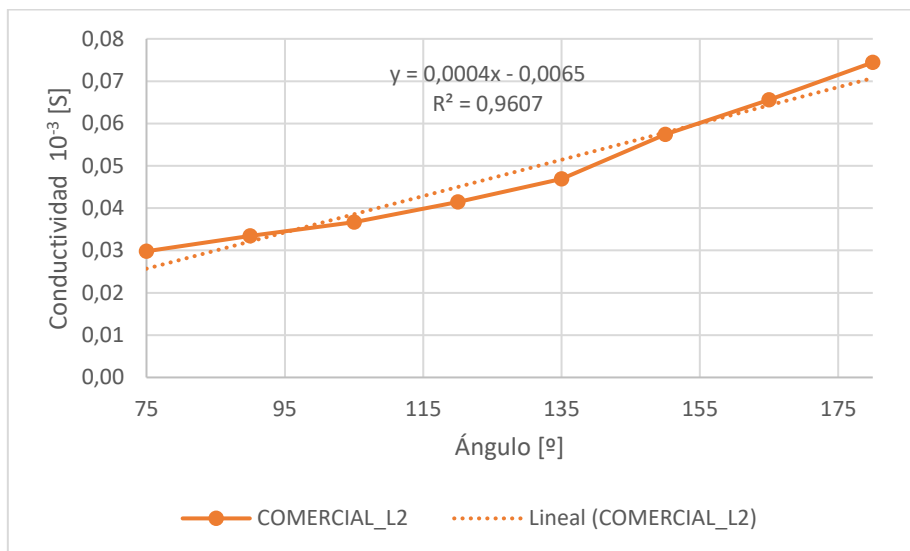
Gráfica 19: Conductividad frente flexión [Comercial-Velostat]



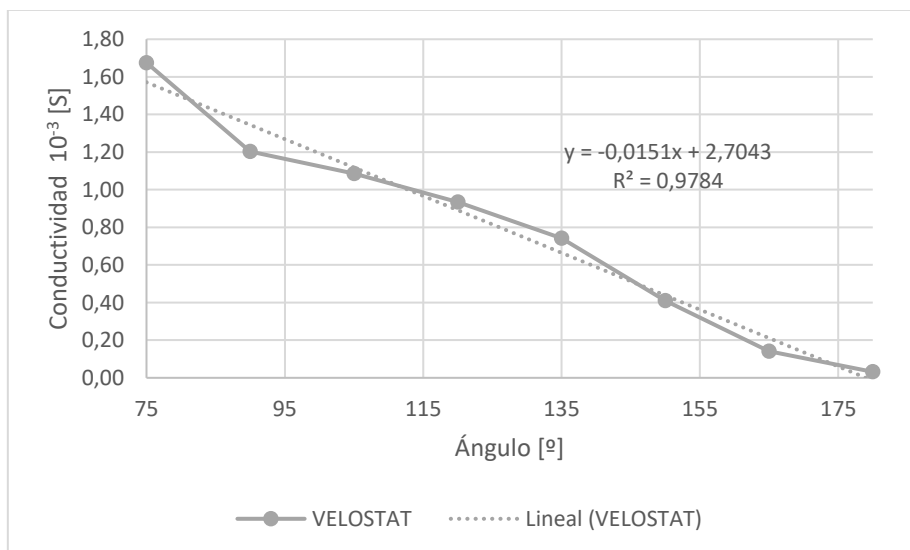
Gráfica 20: Resistividad frente flexión [Comercial-Velostat]



Gráfica 21: Conductividad frente flexión [Comercial_1]

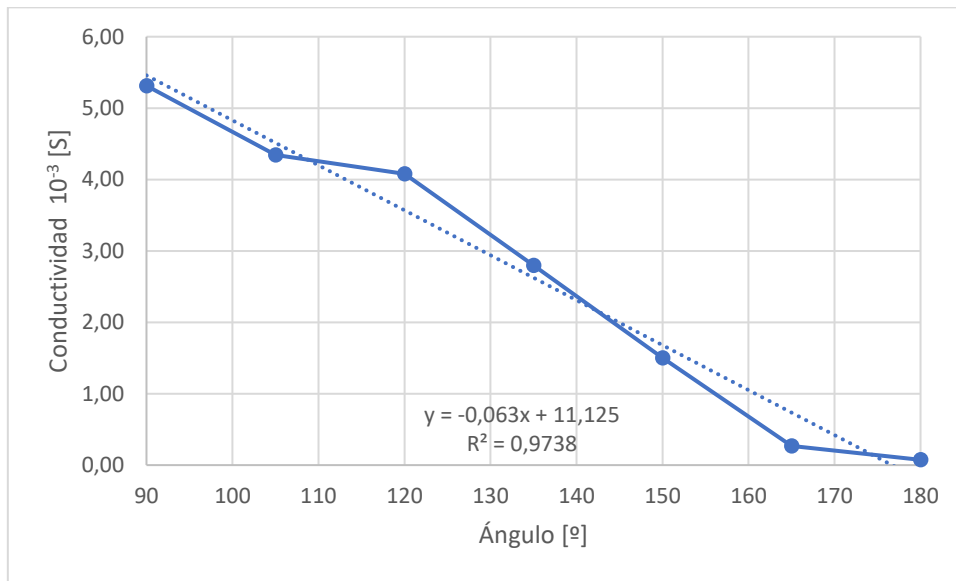


Gráfica 22: Conductividad frente flexión [Comercial_2]

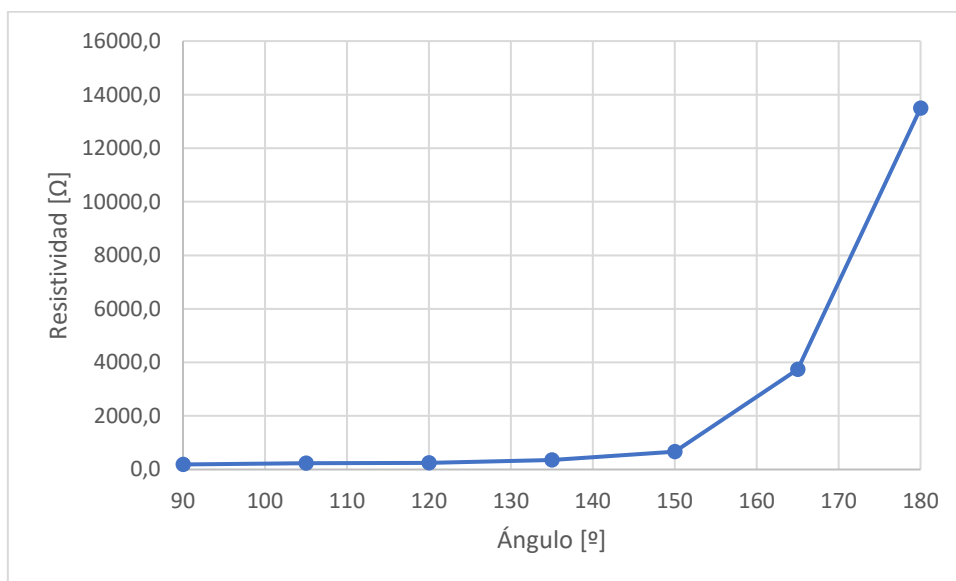


Gráfica 23: Conductividad frente flexión [Velostat]

- Sensor Velostat

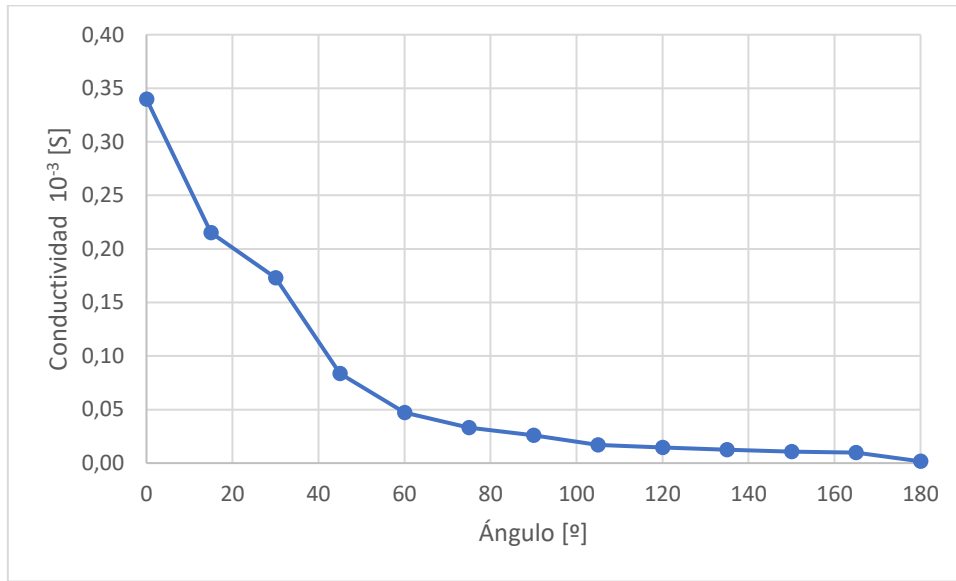


Gráfica 24: Conductividad frente flexión [Velostat]

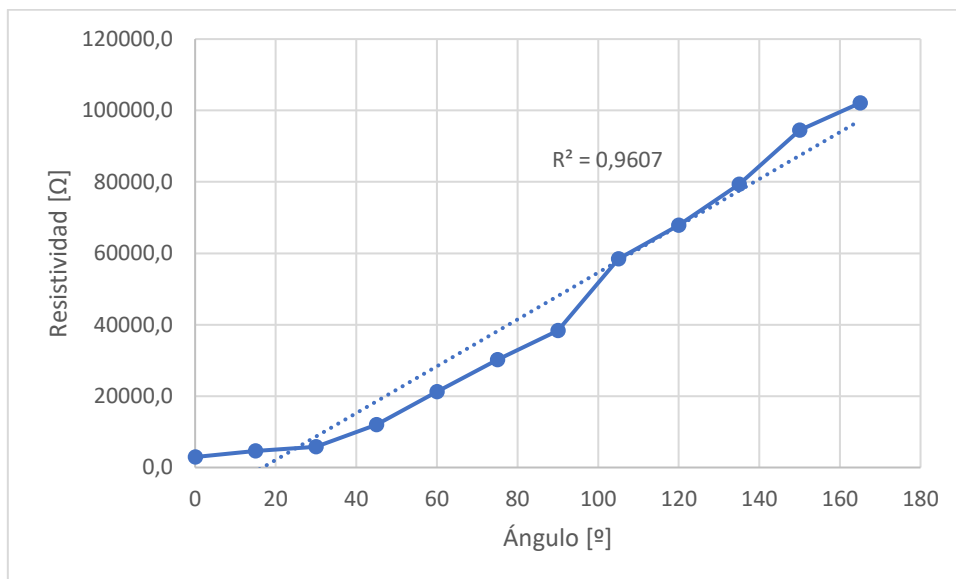


Gráfica 25: Resistividad frente flexión [Velostat]

- Sensor Velostat – Flexión 180°



Gráfica 26: Conductividad frente flexión 180° [Velostat]



Gráfica 27: Resistividad frente flexión 180° [Velostat]

6. PROPUESTA DE SENSOR

Tras haber empleado diferentes materiales como conductores y estudiar los resultados obtenidos, se ha optado por emplear una cinta de cobre, ya que cubre la superficie sobre el sensor, sin añadir resistencia ni rigidez; por lo que no interactúa a la hora de doblar el sensor. La utilización de tinta conductiva se ha descartado, ya que con el tiempo se cuarteaba y no aseguraba una conexión estable y fiable. Así mismo el uso de cables rígidos se ha descartado para evitar que interfirieran con las medidas, ya que aportan rigidez.

Al añadir capas de *Velostat* en los sensores se consiguen mayores rangos de resistencia entre los extremos estudiados. Al aumentar el rango es posible obtener una mayor precisión en la lectura de valores. Se ha optado por fabricar los sensores con tres capas de material, ya que al aumentar las capas las variaciones en los resultados obtenidos son menores, sigue existiendo una gran linealidad y se ha aumentado el rango de resistencia.

Para encapsular el sensor y los conductores se han valorado distintas opciones. Para asemejarse al acabado de los sensores comerciales se ha estudiado la opción de plastificar los sensores, para proporcionarlos de un acabado profesional; esta opción ha sido descartada ya que al desear que los sensores trabajen midiendo dos articulaciones en movimiento el plastificado no resultaba duradero después de escasas pruebas de estrés.

Como opción adoptada se han fabricado los sensores en el interior de dos capas de cinta americana, que mantienen los componentes fijos en su sitio y no ofrecen una rigidez extra al sensor. De esta forma los sensores son capaces de doblarse incluso 180°, superando por mucho las limitaciones de los comerciales.

En resumen, los sensores constarán de tres capas de *Velostat*, con conductores de cinta de cobre y el encapsulado se realizará con cinta adhesiva.

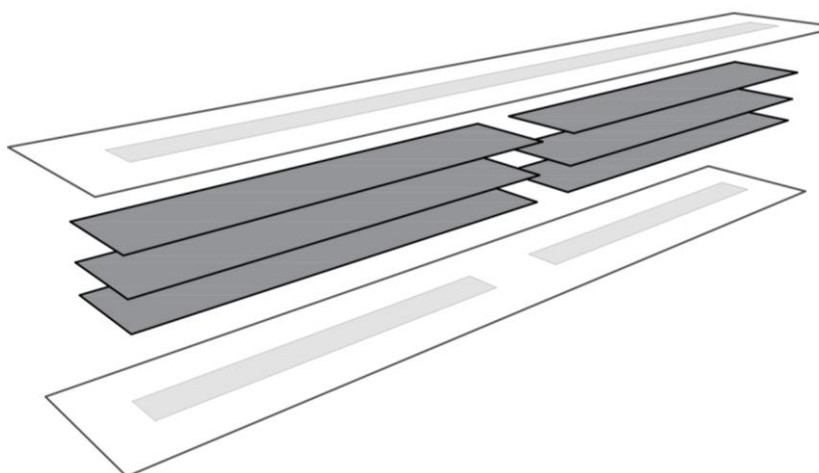


Ilustración 3: Capas del sensor

7. OTROS ESTUDIOS REALIZADOS

Otras opciones valoradas para la realización de los sensores son:

A. Fibra

Con el empleo de la fibra el valor a medir sería la atenuación que se produce en un haz de luz que atraviesa la fibra al ser doblada. El circuito empleado para esta prueba consistía en un láser de luz infrarroja y un fotorresistor [LDR], una resistencia que cuyo valor varía en función de la luz recibida.

Este montaje requiere de una mayor precisión en su ejecución ya que es necesario asegurar que el haz de luz esté viaje a través de la fibra y que el receptor esté alineado para evaluar la atenuación.

En las pruebas realizadas las diferencias en la tensión eran mínimas. Es probable que este resultado sea debido a que el fotorresistor no era de gran calidad, era capaz de medir cambios observables en la luz sin dificultad, pero en cambio variaciones más sutiles como esta arrojaban valores poco fiables.

Visto los resultados, la mayor complejidad en el montaje y en el precio de este prototipo se descartó.

B. Grafito como conductor

El grafito es un material semiconductor, por lo que se ha intentado aprovechar esta característica para estudiar si al ser sometido a fuerzas externas variaba sensiblemente su resistividad.

Se siguió el mismo esquema empleado para fabricar los sensores de *Velostat*, sustituyéndolos por capas de grafito adheridas en papel. El resultado fue insatisfactorio, ya que las únicas variaciones se observaban en puntos extremos y no en puntos intermedios. Además, estas variaciones no eran significativas.

El hecho de no presentar una linealidad, ni un mayor rango de cambio descartaron esta opción.

Es probable que una mayor densidad de grafito y una mayor homogeneidad aporten distintos resultados.

PARTE 2: GUANTE DE DATOS

1. ADAPTACIÓN DE GUANTE



Ilustración 4: Diseño de guante

El guante ha sido elaborado con tres capas de licra elástica. Una de ellas forma la palma mientras que otras dos forman el dorso, para de esta forma, crear un espacio intermedio, en el que almacenar los sensores, el cableado y el ESP32.

La última capa que forma el dorso de la mano tiene una apertura para permitir la inserción de los sensores en los carriles cosidos en los dedos, de esta forma se asegura que los sensores se mantienen en sus posiciones sin importar los movimientos. En la parte de abajo hay espacio para colocar el ESP32, de forma que dentro del guante se guardan todos sus componentes y no es necesario material adicional para su funcionamiento (exceptuando la fuente de alimentación).

Cada dedo contiene dos sensores, encargados de medir la flexión de las dos articulaciones principales. Cada uno de los sensores tiene un total de tres cables; uno de alimentación y dos con las señales obtenidas en cada articulación.

Para la elaboración de los sensores de cada dedo se ha tenido en cuenta tanto el tamaño disponible como el centro de la flexión de las articulaciones. De esta forma cada sensor tiene un tamaño único, por lo que será necesario una resistencia propia para acondicionar cada uno de los diez sensores.

A continuación, se muestran los valores máximos y mínimos de tensión correspondientes con los valores extremos de las articulaciones, que corresponden con la posición de mano abierta y cerrada. Con estos valores se ha calculado la resistencia óptima que permite aprovechar el mayor rango de caída de tensión en dicha resistencia.

M_1		Abierto	Cerrado	M_2		Abierto	Cerrado
V_{o_m1}	[V]	1,768	2,874	V _{o_m1}	[V]	0,634	2,754
V_{o_m2}	[V]	1,718	2,877	V _{o_m2}	[V]	0,854	2,653
V_{o_m3}	[V]	1,609	2,832	V _{o_m3}	[V]	0,728	2,626
V_{o_media}	[V]	1,698	2,861	V _{o_media}	[V]	0,739	2,678
R_{sensor}	[Ω]	9442,6	1541,4	R _{sensor}	[Ω]	34702,2	2331,6
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,11	0,65	σ _{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,03	0,43
V_{o_opt}	[V]	0,950	2,352	V _{o_opt}	[V]	0,680	2,622
42,45%	ΔV	1,402		58,83%	ΔV	1,943	
	R _{2_opt}	3815,101			R _{2_opt}	8995,156	

Tabla 1: Acondicionamiento de resistencias [Meñique]

A_1		Abierto	Cerrado	A_2		Abierto	Cerrado
V_{o_m1}	[V]	1,082	2,947	V _{o_m1}	[V]	0,571	2,986
V_{o_m2}	[V]	1,065	2,854	V _{o_m2}	[V]	1,143	2,941

V_{o_m3}	[V]	1,334	2,901	V_{o_m3}	[V]	0,903	3,039
V_{o_media}	[V]	1,160	2,901	V_{o_media}	[V]	0,872	2,989
R_{sensor}	[Ω]	18457,3	1383,6	R_{sensor}	[Ω]	27852,5	1048,4
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,05	0,72	σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,04	0,95
V_{o_opt}	[V]	0,710	2,592	V_{o_opt}	[V]	0,537	2,765
57,01%	ΔV	1,883		67,50%	ΔV	2,229	
	R_{2_opt}	5053,456			R_{2_opt}	5403,768	

Tabla 2: Acondicionamiento de resistencias [Anular]

C_1		Abierto	Cerrado	C_2		Abierto	Cerrado
V_{o_m1}	[V]	1,859	2,703	V_{o_m1}	[V]	1,574	2,982
V_{o_m2}	[V]	1,693	2,658	V_{o_m2}	[V]	1,538	2,956
V_{o_m3}	[V]	1,509	2,731	V_{o_m3}	[V]	1,623	3,004
V_{o_media}	[V]	1,687	2,697	V_{o_media}	[V]	1,578	2,981
R_{sensor}	[Ω]	9573,2	2241,7	R_{sensor}	[Ω]	10920,8	1078,1
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,10	0,45	σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,09	0,93
V_{o_opt}	[V]	1,077	2,225	V_{o_opt}	[V]	0,789	2,513
34,78%	ΔV	1,148		52,18%	ΔV	1,723	
	R_{2_opt}	4632,546			R_{2_opt}	3431,219	

Tabla 3: Acondicionamiento de resistencias [Corazón]

I_1		Abierto	Cerrado	I_2		Abierto	Cerrado
V_{o_m1}	[V]	1,723	2,667	V_{o_m1}	[V]	1,749	2,819
V_{o_m2}	[V]	1,676	2,663	V_{o_m2}	[V]	1,689	2,846
V_{o_m3}	[V]	1,641	2,705	V_{o_m3}	[V]	1,72	2,887
V_{o_media}	[V]	1,680	2,678	V_{o_media}	[V]	1,719	2,851
R_{sensor}	[Ω]	9654,8	2328,6	R_{sensor}	[Ω]	9205,1	1583,3
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,10	0,43	σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,11	0,63
V_{o_opt}	[V]	1,088	2,214	V_{o_opt}	[V]	0,968	2,334
34,13%	ΔV	1,127		41,37%	ΔV	1,366	
	R_{2_opt}	4741,491			R_{2_opt}	3817,599	

Tabla 4: Acondicionamiento de resistencias [Índice]

P_1		Abierto	Cerrado	P_2		Abierto	Cerrado
V_{o_m1}	[V]	1,357	2,217	V_{o_m1}	[V]	1,994	2,628
V_{o_m2}	[V]	1,341	2,324	V_{o_m2}	[V]	2,074	2,713

V_{o_m3}	[V]	1,328	2,307	V _{o_m3}	[V]	2,023	2,646
V_{o_media}	[V]	1,342	2,283	V _{o_media}	[V]	2,030	2,662
R_{sensor}	[Ω]	14605,1	4465,5	R _{sensor}	[Ω]	6263,3	2402,7
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,07	0,22	σ _{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,16	0,42
V_{o_opt}	[V]	1,176	2,126	V _{o_opt}	[V]	1,263	2,039
28,79%	ΔV	0,951		23,51%	ΔV	0,776	
	R _{2_opt}	8075,857		R _{2_opt}		3879,260	

Tabla 5: Acondicionamiento de resistencias [Pulgar]

Los valores medios para la posición de abierto y cerrado, así como para la resistencia óptima media son:

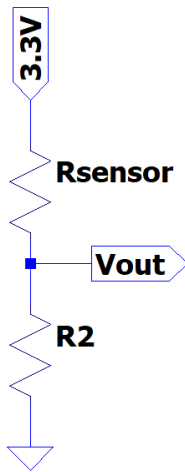
R_{abierto}	15067,7
R_{cerrado}	2040,5
R_{opt}	5184,545

Tabla 6: Valores medios

Entre el valor mínimo y el máximo hay una diferencia de 13 kΩ lo que permite obtener tensiones diferenciables cada 15° [los puntos estudiados en los ensayos son a este intervalo de ángulo].

Las resistencias elegidas son el valor normalizado más próximo al obtenido en las tablas 1-5.

2. DIVISOR DE TENSIÓN



La salida de un divisor de tensión depende de la tensión de entrada, fijada por la salida de 3.3 V del ESP32 y de los valores de resistencias. El valor de resistencia del sensor variará y el valor de R_2 se mantendrá fijo y conocido.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_s + R_2} \cdot V_{in}$$

Ilustración 5: Divisor de tensión

De momento se ha optado por emplear resistencias de valor conocido para elaborar el divisor de tensión. Si el diseño de los sensores contara con más articulaciones o puntos de interés para medir, se podría optar por prescindir de estas resistencias y obtener los valores de los sensores de manera relativa en vez de absoluta.

Con una lectura simultánea de todos los puntos que conforman el sensor se conocerían las resistencias en función del resto, por lo que se podría obtener la información a estudiar sin añadir elementos externos.

No se ha empleado en este proyecto, ya que implica una necesidad de análisis de los datos más compleja y este trabajo está centrado en estudiar la viabilidad del *Velostat* como sensor.

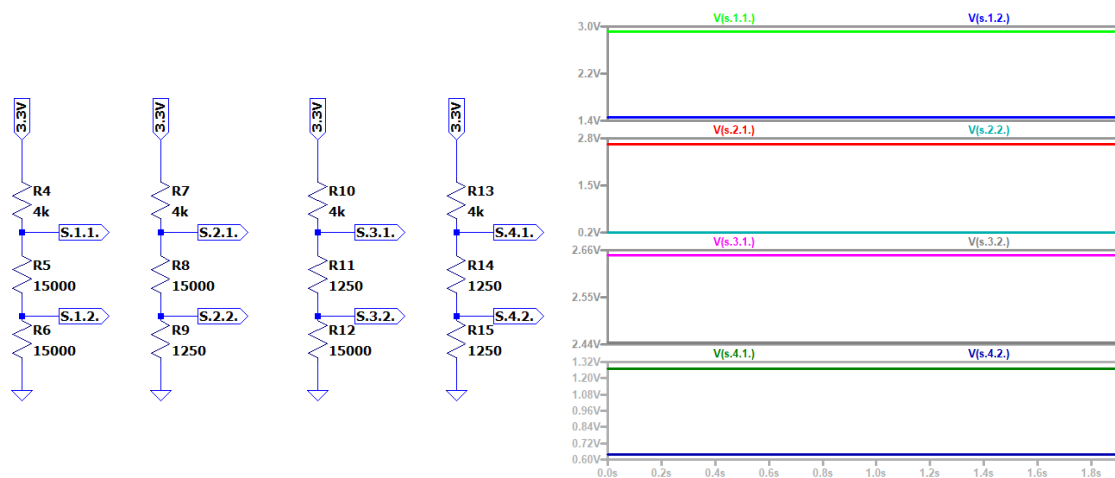


Ilustración 6: Simulación de variación de resistencia de los sensores en posiciones extremas

PARTE 3: LECTURA Y ENVÍO DE DATOS

1. ELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR

A continuación, se realizará un resumen explicando las razones que han llevado a la elección del ESP32. Los requisitos que debe presentar el microcontrolador para este proyecto son:

- 10 entradas analógicas.
- 10 salidas PWM.
- Conectividad inalámbrica.
- Tamaño compacto.
- Bajo consumo.

1.1. PIC

Un PIC o Controlador de Interfaz Periféricos es un circuito integrado programable que puede resultar una buena opción a la hora de desarrollar un producto final, pero en la fase de prototipado no son tan indicados ya que es necesario ensamblarlos en una placa que se ha de diseñar. Existe una gran variedad de modelos en el mercado, por lo que es sencillo encontrar uno que se adecue a las necesidades. Al no disponer de conectividad inalámbrica integrada, se

debería añadir otro componente a la placa, por lo que su reducido tamaño aumentaría, además de la complejidad del diseño.

1.2. ARDUINO

En el mercado existen diversidad de modelos con diferentes tamaños y especificaciones, pero ninguno de ellos incluye conectividad inalámbrica por lo que se descartan como opción

1.3. ESP8266

Conocido antecesor del ESP32, es una opción que valorar. Al tener un precio similar al siguiente modelo y ser superado en características, queda descartado como una segunda opción.

1.4. ESP32

Dispone de las entradas y salidas necesarias, es compacto y viene con varias opciones de conectividad inalámbrica (WiFi, Bluetooth, BLE, RF), por lo que resulta una opción idónea para desarrollar el prototipo. Su consumo es bajo y es económico.

2. ESP32 DevKitC

El ESP32 es un SoC [System on Chip] diseñado por la compañía china Espressif y está fabricado por TSMC. Dispone de conectividad WiFi [802.11 b/g/n] y Bluetooth [v4.2 BR/EDR y BLE].

El módulo seleccionado para llevar a cabo la recopilación de datos de los sensores, transmitir la información de forma inalámbrica y controlar los actuadores de la mano robótica, dispone de las 10 entradas analógicas necesarias. Dispone de un convertor analógico digital SAR [Successive Approximation Register], un CAD de aproximaciones sucesivas de 12 bits. Ofrece varias opciones válidas para realizar la comunicación inalámbrica.

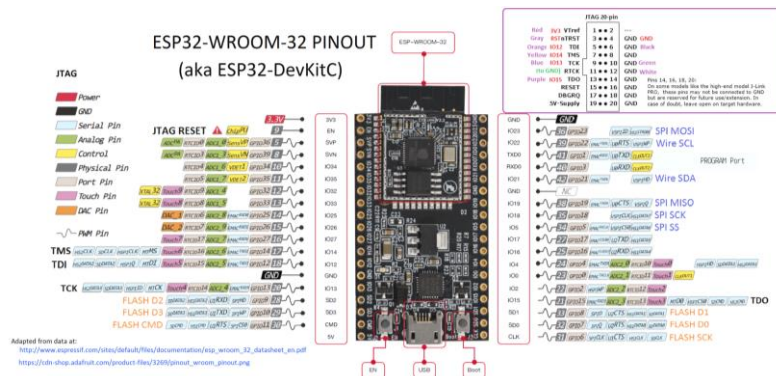


Ilustración 7: ESP32 Pinout

3. CONECTIVIDAD INALÁMBRICA

Para la comunicación entre los dos dispositivos ESP32 se ha optado por evitar los cables y que se realice de forma inalámbrica. Las características necesarias son:

- Alcance del orden de metros
- Bajo consumo
- No es necesario altas velocidades de transferencia

Tecnología	Consumo	Velocidad	Tipo	Rango	Malla	Frecuencia
Bluetooth	Bajo	2-3 Mbps	PAN	50m	No	2.4 GHz
Bluetooth LE	Muy bajo	1 Mbps	PAN	50m	32.767	2.4 GHz
ZigBee	Muy bajo	250 kbps	PAN	100m	65.000	915MHz / 2.4 GHz
Z-Wave	Muy bajo	100 kps	PAN	150m	232	868/908 MHz
6LowPAN	Muy bajo	Bajo	PAN	100m	Si	2.4 GHz
WiFi / WiFi Direct	Alto	250Mbps	LAN	+100m	No	2.4 GHz / 5 GHz
LoRa / LoRaWAN	Bajo	27 kbps	LPWAN	+10km	No	868 / 915 MHz
GSM/GPRS	Muy alto	Moderado	WAN	35 km	No	850 MHz / 1.9 GHz
LTE	Muy alto	Alto	WAN	Alto	No	Varias

Tabla 7: Comparativa de conectividad inalámbrica

3.1. WiFi

Esta tecnología inalámbrica ampliamente extendida excede las necesidades del proyecto ya que ofrece una velocidad de transmisión más rápida de lo requerido con el consecuente aumento en el consumo. Al no precisar transmitir una gran cantidad de datos ni una gran velocidad, el aumento en el consumo no está justificado como para elegirlo.

Es una opción valorable en el caso que se desee recolectar los datos en un servidor, para posteriormente analizarlos. De esta forma se podría recopilar la información a cualquier distancia del guante.

3.2. Bluetooth

Esta tecnología posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace de radiofrecuencia en la banda de los 2.4 GHz. Se ha establecido como uno de los estándares más extendidos a nivel mundial y hoy en día se emplea comúnmente para infinidad de comunicaciones inalámbricas.

Es una opción viable para ser la encargada de comunicar ambos módulos ya que cumple de sobra las necesidades anteriormente descritas.

3.3. BLE

Se trata de una tecnología de red de área personal inalámbrica [WPAN, Wireless Personal Area Network]. Esta tecnología mantiene el alcance del Bluetooth clásico, ofreciendo un menor consumo y costes reducidos. Se emplea en comunicaciones que no requiere de una gran velocidad de transmisión ni grandes cantidades de datos.

Al cumplir todos los requisitos para transmitir los datos obtenidos en los sensores al actuador será el protocolo de comunicación empleado. Ya que disfruta de las ventajas del Bluetooth clásico ofreciendo menores consumos, lo que se traduce en mayor autonomía.

4. ALIMENTACIÓN

Existen varias formas de alimentación para las tarjetas de desarrollo ESP32, se pueden alimentar mediante cable micro USB con una tensión de 5 V o mediante pines, de esta última forma la alimentación tiene dos tensiones posibles 3'3 V y 5 V. Algunos modelos incluyen directamente en la placa una conexión directa para baterías LiPo.

En el caso del módulo encargado de la recopilación de datos no es necesario alcanzar una tensión de 5V, por lo tanto, si se alimentara a través de la patilla de 3'3 V se evitaría el paso por el convertidor reductor [Buck] y su respectiva pérdida de energía. Al no disponer de una fuente de alimentación con esta tensión, se usará una batería portátil [powerbank] y se alimentará el dispositivo a través del cable micro USB.

Por el contrario, en el caso de los actuadores, al necesitar una corriente más elevada que la que puede suministrar la tarjeta de desarrollo, se alimentará directamente a una tensión de 5 V obtenidos directamente de la fuente de alimentación. También se empleará la conexión micro USB para alimentar el dispositivo.

PARTE 4: MANO ROBÓTICA

Como posible utilidad de los sensores, se ha optado por desarrollar una mano robótica que replique el movimiento del guante. Para ello se empleará un módulo ESP32, que recibirá la información mediante BLE y controlará los pulsos PWM encargados de controlar los servomotores de las articulaciones de la mano.

1. ESP32

En esta sección el módulo ESP32 recibirá las señales de posición de los grados de libertad establecidos en el guante y los transmitirá a los actuadores para replicar ese movimiento en la mano robótica.

Los valores de tensión de los sensores se han convertido de tensión a un valor decimal comprendido entre 0 y 4095 [000000000000 - 111111111111]. Este rango se debe convertir, en este apartado, en los grados que se moverá el actuador. Se realizará mediante software con la función de mapeo. Esta función toma los valores extremos del rango (el mínimo y el máximo) e interpola los valores intermedios de manera lineal.

Grado (guante) → Tensión (sensor) → Valor decimal (ESP32) → Grado (mano robótica)

2. ACTUADOR

MANO ROBÓTICA

Se ha imprimido un modelo en tres dimensiones de la marca *Youbionic* que dispone de dos grados de libertad por dedo, lo cual nos permite replicar el movimiento medido por los sensores. A diferencia del resto de dedos, el pulgar cuenta con tres grados de libertad, de los cuales únicamente se utilizarán dos para la demostración.

Se ha empleado una impresora 3D de la marca *Ender* y bobinas de PLA de *Sakata 3D* como filamento. Una vez impresas las piezas necesarias, se han empleado tornillos de métrica 3 para el montaje y micro servo SG90 como actuadores encargados del movimiento de las articulaciones.

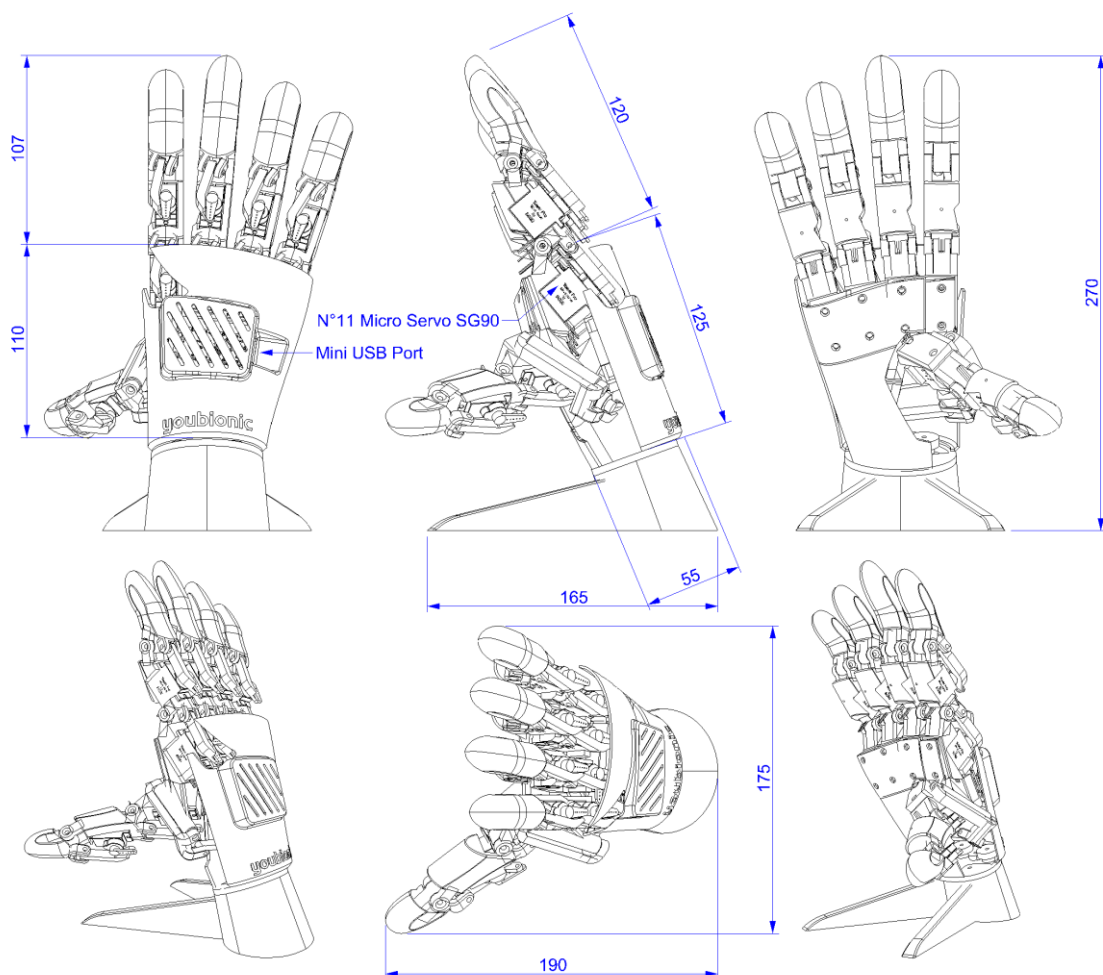


Ilustración 8: Dibujo técnico de la mano robótica [Youbionic]

SERVOMOTOR

Para la movilidad de las articulaciones de la mano robótica se emplearán servomotores. Los servomotores son motores paso a paso con control sobre la posición. Se emplearán micro servos SG90 debido a su tamaño. Tiene control de posición sobre un total de 180° y un par de torsión de 1.6 kg·cm.



Ilustración 9: Esquema conexiones servomotor

Disponen de tres cables para alimentar al actuador: tensión de alimentación, tierra y señal de control. La señal para controlar la posición es una señal de modulación por ancho de pulsos [PWM: Pulse-Width Modulation]. Con una variación del ciclo de trabajo de la señal se enviarán las distintas posiciones a las que se desea que el motor gire.

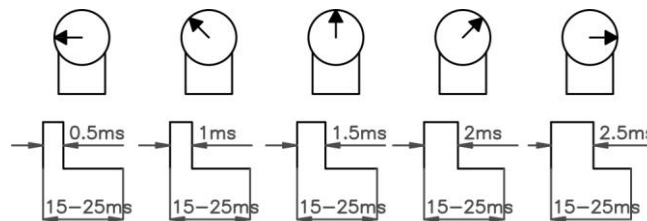


Ilustración 10: Posición del servomotor en función del ciclo de trabajo

El servo está compuesto por un motor al que se le acopla una serie de engranajes que hacen efecto reductor, lo que aumenta en par de torsión. El eje de movimiento está sincronizado con un potenciómetro que provocará una variación de voltaje. Esta variación permite que el circuito de control pueda retroalimentarse con la posición del motor en ese momento concreto.

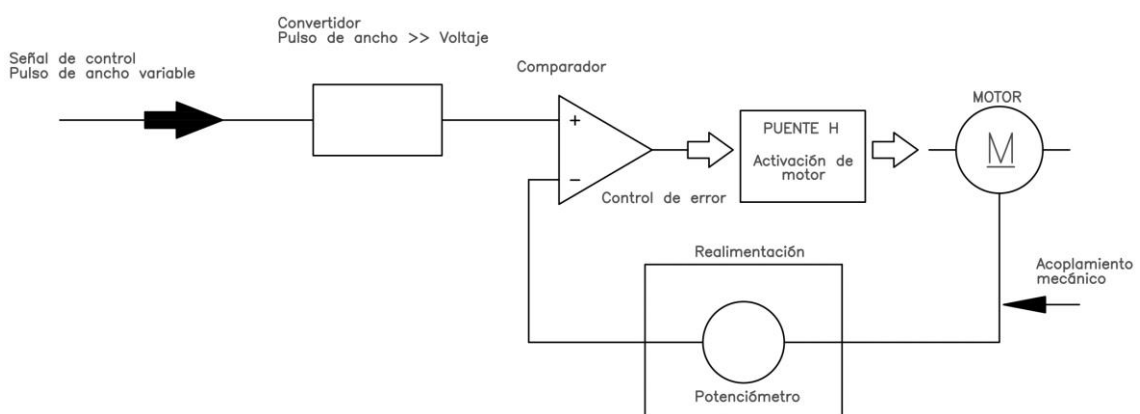


Ilustración 11: Control de posición del servomotor

3. RESUMEN DE LA PROPUESTA



Ángulo (guante) → Tensión (sensor) → Valor decimal (ESP32) → Ángulo (mano robótica)

Ilustración 12: Esquema funcionamiento



Ilustración 13: mano robótica [Youbionic]

PARTE 5: CONCLUSIONES

Se ha demostrado la efectividad del material *Velostat* como sensor de bajo coste y posible sustituto de los sensores comerciales de la actualidad. Su gran variación de resistividad al ser sometido a esfuerzos ofrece un amplio rango para la recopilación de diferentes medidas según las necesidades del usuario. [Flexión de articulaciones, plantillas de calzado capaz de analizar los diferentes puntos de presión, matriz de presión].

Con dos tarjetas de desarrollo se ha implementado un sistema de comunicación inalámbrica capaz de recopilar los datos generados por los sensores y replicar el grado de giro de las articulaciones en una mano robótica, como ejemplo de posible producto del proyecto. Así mismo estos datos se podrían emplear para interactuar con entornos de realidad virtual sin la necesidad de accesorios más allá del guante; para el seguimiento de una lesión, valorando la evolución de la capacidad del movimiento con el registro de los datos etc.

1. LÍNEAS FUTURAS

- Emplear el procesador del ESP32 integrado en una PCB propia que reduzca el tamaño y optimice todos los componentes. GPIO necesarios.
- Implementar software para prescindir de las resistencias del divisor de tensión en el caso de introducir más sensores en paralelo.
- Implementar encriptación en la comunicación inalámbrica.
- Implementar conexión WiFi con un servidor para almacenamiento de los datos recopilados y posible tratamiento en un software dedicado.

2. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Sygulla, F. Ellensohn, A. C. Hildebrandt, D. Wahrmann, and D. Rixen, "A flexible and low-cost tactile sensor for robotic applications," *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, pp. 58–63, 2017, doi: 10.1109/AIM.2017.8013995.
- [2] L. S. Pardue, C. Harte, and A. P. McPherson, "A Low-Cost Real-Time Tracking System for Violin," *J. New Music Res.*, vol. 44, no. 4, pp. 305–323, 2015, doi: 10.1080/09298215.2015.1087575.
- [3] S. Salibindla, B. Ripoché, D. T. H. Lai, and S. Maas, "Characterization of a new flexible pressure sensor for body sensor networks," *Proc. 2013 IEEE 8th Int. Conf. Intell. Sensors, Sens. Networks Inf. Process. Sens. Futur. ISSNIP 2013*, vol. 1, pp. 27–31, 2013, doi: 10.1109/ISSNIP.2013.6529758.
- [4] J. Nassour, V. Ghadiya, V. Hugel, and F. H. Hamker, "Design of new Sensory Soft Hand: Combining air-pump actuation with superimposed curvature and pressure sensors," *2018 IEEE Int. Conf. Soft Robot. RoboSoft 2018*, no. June, pp. 164–169, 2018, doi: 10.1109/ROBOSOFT.2018.8404914.
- [5] A. Sreejan and Y. Shivraj Narayan, "Development of Flex Sensor Array To Identify Damage on Sheet Metal," no. October, 2017.
- [6] C. I. Calle and D. Ph, "Final Report : Electrostatic Evaluation of the SRB Velostat™ Pads Electrostatics and Surface Physics Laboratory Written by : Approved by :," pp. 1–9, 2019.
- [7] H. Carvalho, Y. Yao, and L. M. Gonçalves, "Flexible force sensors for e-textiles," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 254, no. 7, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/254/7/072007.
- [8] D. Giovanelli and E. Farella, "Force Sensing Resistor and Evaluation of Technology for Wearable Body Pressure Sensing," *J. Sensors*, vol. 2016, no. February, 2016, doi: 10.1155/2016/9391850.
- [9] J. Tolvanen, J. Hannu, and H. Jantunen, "Hybrid foam pressure sensor utilizing piezoresistive and capacitive sensing mechanisms," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 15, pp. 4735–4746, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2718045.
- [10] E. Li, X. Lin, B. C. Seet, F. Joseph, and J. Neville, "Low profile and low cost textile smart mat for step pressure sensing and position mapping," *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, vol. 2019-May, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/I2MTC.2019.8826892.
- [11] S. S. Suprpto, A. W. Setiawan, H. Zakaria, W. Adiprawita, and B. Supartono, "Low-Cost Pressure Sensor Matrix Using Velostat," *Proc. 2017 5th Int. Conf. Instrumentation, Commun. Inf. Technol. Biomed. Eng. ICICI-BME 2017*, no. November, pp. 137–140, 2018, doi: 10.1109/ICICI-BME.2017.8537720.
- [12] A. R. DeAngelis, D. B. Wilson, and B. A. Mazzeo, "Printed capacitive sensor," vol. 2007, no. August, 2007.
- [13] J. Ahmad, H. Andersson, and J. Sidén, "Screen-Printed Piezoresistive Sensors for Monitoring Pressure Distribution in Wheelchair," *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 6, pp. 2055–2063, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2018.2885638.

3. ANEXOS

Ensayo de peso con área de sensor de 6'25 cm²

		V_i	3,302		R₂	10000			
1 CAPA		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]
V_{o_m1}	[V]	0,2503	0,652	0,768	1,055	1,234	1,427	1,968	2,336
V_{o_m2}	[V]	0,2166	0,613	0,772	1,046	1,265	1,41	1,904	2,400
V_{o_m3}	[V]	0,2231	0,687	0,785	1,063	1,336	1,415	1,915	2,310
V_{o_media}	[V]	0,230	0,651	0,775	1,055	1,278	1,417	1,929	2,349
R_{sensor}	[Ω]	133565,2	40748,0	32606,5	21308,5	15830,5	13297,3	7117,7	4059,0
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06	0,08	0,14	0,25
	70,31%	ΔV	2,322		R _{2_opt}	23284,043			
V_{o_opt}	[V]	0,490	1,201	1,376	1,724	1,966	2,102	2,529	2,812
2 CAPAS		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]
V_{o_m1}	[V]	0,197	0,623	0,790	0,975	1,224	1,328	1,998	2,311
V_{o_m2}	[V]	0,206	0,667	0,814	1,020	1,261	1,301	2,021	2,343
V_{o_m3}	[V]	0,192	0,674	0,773	1,036	1,260	1,330	1,963	2,382
V_{o_media}	[V]	0,198	0,655	0,792	1,010	1,248	1,320	1,994	2,345
R_{sensor}	[Ω]	156599,4	40437,9	31674,4	22682,3	16451,3	15021,5	6559,7	4079,0
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,15	0,25
	72,21%	ΔV	2,384		R _{2_opt}	25273,948			
V_{o_opt}	[V]	0,459	1,270	1,465	1,740	2,000	2,071	2,622	2,843
3 CAPAS		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]
V_{o_m1}	[V]	0,195	0,620	0,806	1,075	1,406	1,485	2,136	2,580
V_{o_m2}	[V]	0,207	0,649	0,847	1,094	1,400	1,477	2,141	2,600
V_{o_m3}	[V]	0,212	0,662	0,861	1,082	1,398	1,494	2,166	2,615
V_{o_media}	[V]	0,204	0,644	0,838	1,084	1,401	1,485	2,148	2,598
R_{sensor}	[Ω]	151572,3	41299,8	29403,3	20470,6	13563,3	12230,7	5374,8	2708,1
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,19	0,37
	76,42%	ΔV	2,523		R _{2_opt}	20260,307			
V_{o_opt}	[V]	0,389	1,087	1,347	1,642	1,978	2,059	2,610	2,913

4 CAPAS		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]
V_{o_m1}	[V]	1,090	1,987	2,203	2,536	2,633	2,673	2,754	3,200
V_{o_m2}	[V]	1,145	1,956	2,232	2,553	2,646	2,690	2,760	3,026
V_{o_m3}	[V]	1,158	1,971	2,240	2,570	2,656	2,697	2,765	3,029
V_{o_media}	[V]	1,131	1,971	2,225	2,553	2,645	2,687	2,760	3,085
R_{sensor}	[Ω]	19195,4	6750,1	4840,4	2933,8	2483,9	2290,3	1965,2	703,4
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,05	0,15	0,21	0,34	0,40	0,44	0,51	1,42
	67,87%	ΔV	2,241		R _{2_opt}	3674,523			
V_{o_opt}	[V]	0,531	1,164	1,425	1,836	1,970	2,034	2,151	2,771

Ensayo de peso con área de sensor de 12'25 cm²

		V_i	3,302				R₂	10000		
1 CAPA		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]	
V_{o_m1}	[V]	0,665	1,119	1,574	1,93	2,17	2,288	2,611	2,775	
V_{o_m2}	[V]	0,722	1,144	1,576	2,026	2,22	2,312	2,63	2,797	
V_{o_m3}	[V]	0,735	1,173	1,6	2,012	2,246	2,3	2,619	2,802	
V_{o_media}	[V]	0,707	1,145	1,583	1,989	2,212	2,300	2,620	2,791	
R_{sensor}	[Ω]	36682,4	18830,0	10854,7	6598,5	4927,7	4356,5	2603,1	1829,5	
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,03	0,05	0,09	0,15	0,20	0,23	0,38	0,55	
	63,49%	ΔV	2,096		R _{2_opt}	8192,032				
V_{o_opt}	[V]	0,603	1,001	1,420	1,829	2,062	2,156	2,506	2,699	
2 CAPAS		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]	
V_{o_m1}	[V]	0,454	1,740	2,188	2,519	2,678	2,802	2,880	2,930	
V_{o_m2}	[V]	0,406	1,752	2,203	2,566	2,690	2,802	2,891	2,940	
V_{o_m3}	[V]	0,477	1,733	2,181	2,570	2,707	2,827	2,901	2,943	
V_{o_media}	[V]	0,446	1,742	2,191	2,552	2,692	2,810	2,891	2,938	
R_{sensor}	[Ω]	64091,2	8958,9	5073,0	2940,6	2267,5	1749,4	1423,0	1240,2	
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,02	0,11	0,20	0,34	0,44	0,57	0,70	0,81	
	75,58%	ΔV	2,496		R _{2_opt}	8915,539				
V_{o_opt}	[V]	0,403	1,647	2,105	2,483	2,632	2,760	2,848	2,899	
3 CAPAS		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]	
V_{o_m1}	[V]	0,411	0,940	1,944	2,420	2,615	2,758	2,898	2,977	
V_{o_m2}	[V]	0,429	0,972	2,003	2,451	2,638	2,722	2,901	2,991	

V_{o_m3}	[V]	0,460	1,630	2,026	2,460	2,645	2,725	2,905	2,999
V_{o_media}	[V]	0,433	1,181	1,991	2,444	2,633	2,735	2,901	2,989
R_{sensor}	[Ω]	66200,0	17967,3	6584,6	3512,5	2542,4	2072,7	1381,0	1047,2
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,02	0,06	0,15	0,28	0,39	0,48	0,72	0,95

77,66% ΔV 2,564 R_{2_opt} 8326,040

V_{o_opt}	[V]	0,369	1,046	1,844	2,322	2,530	2,644	2,832	2,933
--------------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

4 CAPAS		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]
V_{o_m1}	[V]	0,274	1,014	1,876	2,496	2,600	2,821	2,903	3,052
V_{o_m2}	[V]	0,325	1,022	1,952	2,528	2,781	2,829	2,920	3,077
V_{o_m3}	[V]	0,363	1,090	1,992	2,540	2,791	2,836	2,926	3,083
V_{o_media}	[V]	0,321	1,042	1,940	2,521	2,724	2,829	2,916	3,071
R_{sensor}	[Ω]	92962,3	21689,1	7020,6	3096,2	2121,9	1673,3	1322,4	753,4
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,01	0,05	0,14	0,32	0,47	0,60	0,76	1,33

83,48% ΔV 2,757 R_{2_opt} 8368,668

V_{o_opt}	[V]	0,273	0,919	1,796	2,410	2,634	2,752	2,851	3,029
--------------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Ensayo de peso con área de sensor de 22'25 cm²

		V_i	3,302		R₂	10000			
1 CAPA		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]
V_{o_m1}	[V]	1,965	2,056	2,185	2,356	2,46	2,531	2,998	3,057
V_{o_m2}	[V]	1,982	2,075	2,202	2,382	2,492	2,595	3,001	3,034
V_{o_m3}	[V]	1,993	2,093	2,211	2,392	2,505	2,599	3,003	3,089
V_{o_media}	[V]	1,980	2,075	2,199	2,377	2,486	2,575	3,001	3,060
R_{sensor}	[Ω]	6676,8	5915,8	5013,6	3893,4	3284,2	2823,3	1004,2	790,8
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,15	0,17	0,20	0,26	0,30	0,35	1,00	1,26

48,79% ΔV 1,611 R_{2_opt} 2297,895

V_{o_opt}	[V]	0,845	0,924	1,038	1,226	1,359	1,482	2,298	2,457
--------------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

2 CAPAS		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]
V_{o_m1}	[V]	1,194	1,924	2,301	2,647	2,779	2,807	2,923	3,007
V_{o_m2}	[V]	1,216	1,991	2,332	2,651	2,796	2,801	2,944	3,027
V_{o_m3}	[V]	1,249	2,008	2,346	2,653	2,792	2,819	2,948	3,052
V_{o_media}	[V]	1,220	1,974	2,326	2,650	2,789	2,809	2,938	3,029
R_{sensor}	[Ω]	17073,0	6724,6	4194,0	2458,8	1839,4	1754,8	1237,7	902,5

σ_{sensor}	10^{-3} [S]	0,06	0,15	0,24	0,41	0,54	0,57	0,81	1,11
--------------------------	---------------	------	------	------	------	------	------	------	------

	62,61%	ΔV	2,067		R_2_{opt}	3925,320			
--	--------	------------	-------	--	--------------------	----------	--	--	--

V_o_{opt}	[V]	0,617	1,217	1,596	2,030	2,248	2,282	2,510	2,685
--------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

3 CAPAS		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]
----------------	--	-------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	----------

V_o_{m1}	[V]	0,786	1,443	1,884	2,195	2,395	2,525	2,720	2,904
-------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

V_o_{m2}	[V]	0,802	1,446	1,916	2,206	2,407	2,532	2,774	2,911
-------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

V_o_{m3}	[V]	0,808	1,491	1,928	2,216	2,414	2,535	2,793	2,916
-------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

V_o_{media}	[V]	0,799	1,460	1,909	2,206	2,405	2,531	2,762	2,910
----------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

R_{sensor}	[Ω]	31343,9	12616,4	7294,0	4970,5	3727,8	3047,9	1953,7	1345,8
---------------------	--------------	---------	---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

σ_{sensor}	10^{-3} [S]	0,03	0,08	0,14	0,20	0,27	0,33	0,51	0,74
--------------------------	---------------	------	------	------	------	------	------	------	------

	65,67%	ΔV	2,168		R_2_{opt}	6494,774			
--	--------	------------	-------	--	--------------------	----------	--	--	--

V_o_{opt}	[V]	0,567	1,122	1,555	1,870	2,098	2,247	2,538	2,735
--------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

4 CAPAS		0 [g]	50 [g]	100 [g]	200 [g]	300 [g]	400 [g]	800 [g]	1000 [g]
----------------	--	-------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	----------

V_o_{m1}	[V]	0,618	0,977	1,437	2,256	2,395	2,506	2,812	2,911
-------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

V_o_{m2}	[V]	0,637	0,928	1,516	2,260	2,420	2,530	2,822	2,964
-------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

V_o_{m3}	[V]	0,655	0,941	1,538	2,264	2,434	2,544	2,801	3,012
-------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

V_o_{media}	[V]	0,637	0,949	1,497	2,260	2,416	2,527	2,812	2,962
----------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

R_{sensor}	[Ω]	41863,9	24806,7	12057,4	4610,6	3665,3	3068,6	1743,9	1146,6
---------------------	--------------	---------	---------	---------	--------	--------	--------	--------	--------

σ_{sensor}	10^{-3} [S]	0,02	0,04	0,08	0,22	0,27	0,33	0,57	0,87
--------------------------	---------------	------	------	------	------	------	------	------	------

	71,60%	ΔV	2,364		R_2_{opt}	6928,349			
--	--------	------------	-------	--	--------------------	----------	--	--	--

V_o_{opt}	[V]	0,469	0,721	1,205	1,983	2,160	2,288	2,638	2,833
--------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Ensayo de flexión [comercial-Velostat]

V_i **3,302** R_2 **10000**

COMERCIAL_L1		180 [°]	165 [°]	150 [°]	135 [°]	120 [°]	105 [°]	90 [°]	75 [°]
---------------------	--	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	--------

V_o_{m1}	[V]	1,45	1,502	1,1556	1,561	1,599	1,61	1,618	1,626
-------------------	-----	------	-------	--------	-------	-------	------	-------	-------

V_o_{m2}	[V]	1,425	1,505	1,555	1,588	1,601	1,611	1,619	1,625
-------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

V_o_{m3}	[V]	1,42	1,508	1,555	1,586	1,599	1,613	1,619	1,627
-------------------	-----	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

V_o_{media}	[V]	1,432	1,505	1,422	1,578	1,600	1,611	1,619	1,626
----------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

R_{sensor}	[Ω]	13064,0	11940,2	13223,0	10920,8	10641,8	10492,3	10399,5	10307,5
---------------------	--------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

σ_{sensor}	10^{-3} [S]	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
--------------------------	---------------	------	------	------	------	------	------	------	------

	5,92%	ΔV	0,195		R_2_{opt}	11604,218			
--	-------	------------	-------	--	--------------------	-----------	--	--	--

V_{o_opt}	[V]	1,553	1,627	1,543	1,701	1,722	1,734	1,741	1,749
--------------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

COMERCIAL_L2		180 [°]	165 [°]	150 [°]	135 [°]	120 [°]	105 [°]	90 [°]	75 [°]
V_{o_m1}	[V]	1,398	1,315	1,219	1,063	0,984	0,903	0,845	0,766
V_{o_m2}	[V]	1,417	1,305	1,200	1,047	0,963	0,881	0,824	0,761
V_{o_m3}	[V]	1,412	1,304	1,193	1,052	0,955	0,875	0,815	0,748
V_{o_media}	[V]	1,409	1,308	1,204	1,054	0,967	0,886	0,828	0,758
R_{sensor}	[Ω]	13435,1	15244,6	17425,2	21328,3	24135,1	27254,6	29879,2	33542,9
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03

	22,48%	ΔV	0,742		R _{2_opt}	21228,526			
--	--------	----	-------	--	--------------------	-----------	--	--	--

V_{o_opt}	[V]	2,022	1,922	1,813	1,647	1,545	1,446	1,372	1,280
--------------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

VELOSTAT		180 [°]	165 [°]	150 [°]	135 [°]	120 [°]	105 [°]	90 [°]	75 [°]
V_{o_m1}	[V]	0,808	2,007	2,691	2,897	2,972	2,996	3,047	3,108
V_{o_m2}	[V]	0,803	1,973	2,664	2,934	2,998	3,023	3,037	3,123
V_{o_m3}	[V]	0,779	1,823	2,607	2,899	2,978	3,052	3,062	3,117
V_{o_media}	[V]	0,797	1,934	2,654	2,910	2,983	3,024	3,049	3,116
R_{sensor}	[Ω]	31447,7	7070,5	2441,6	1347,1	1070,6	920,5	831,0	596,9
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,03	0,14	0,41	0,74	0,93	1,09	1,20	1,68

	75,78%	ΔV	2,502		R _{2_opt}	4332,641			
--	--------	----	-------	--	--------------------	----------	--	--	--

V_{o_opt}	[V]	0,400	1,255	2,112	2,519	2,648	2,723	2,771	2,902
--------------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Ensayo de flexión [*Velostat*]

		V_i	3,302		R₂	10000			
PLÁSTICO_1		180 [°]	165 [°]	150 [°]	135 [°]	120 [°]	105 [°]	90 [°]	
V_{o_m1}	[V]	1,395	2,631	3,115	3,195	3,215	3,222	3,246	
V_{o_m2}	[V]	1,424	2,184	3,068	3,188	3,223	3,235	3,24	
V_{o_m3}	[V]	1,398	2,398	3,104	3,181	3,231	3,226	3,237	
V_{o_media}	[V]	1,406	2,404	3,096	3,188	3,223	3,228	3,241	
R_{sensor}	[Ω]	13490,6	3733,5	666,5	357,6	245,1	230,3	188,2	
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,07	0,27	1,50	2,80	4,08	4,34	5,31	
	78,87%	ΔV	2,604		R _{2_opt}	1593,461			
V_{o_opt}	[V]	0,349	0,988	2,328	2,697	2,862	2,885	2,953	

PLÁSTICO_2		180 [°]	165 [°]	150 [°]	135 [°]	120 [°]	105 [°]	90 [°]
V_{o_m1}	[V]	0,808	2,007	2,691	2,897	2,972	2,996	3,047
V_{o_m2}	[V]	0,803	1,973	2,664	2,934	2,998	3,023	3,037
V_{o_m3}	[V]	0,779	1,823	2,607	2,899	2,978	3,052	3,062
V_{o_media}	[V]	0,797	1,934	2,654	2,910	2,983	3,024	3,049
R_{sensor}	[Ω]	8490,9	1909,0	659,2	363,7	289,1	248,5	224,4
σ_{sensor}	10 ⁻³ [S]	0,12	0,52	1,52	2,75	3,46	4,02	4,46
	72,04%	ΔV	2,379		R _{2_opt}	1380,223		
V_{o_opt}	[V]	0,462	1,386	2,235	2,613	2,730	2,798	2,840

