



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



MÁSTER EN AUTOMÁTICA E  
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

Universidad Politécnica de Valencia

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**SENSORES TÁCTILES PARA  
APLICACIONES ROBÓTICAS DE  
MANIPULACIÓN**

**Autor**

Andrés López Lahoz

**Director**

Martín Mellado Arteché





---

## Agradecimientos

A todas aquellas personas que con su ayuda y apoyo diario han hecho posible alcanzar este objetivo y han apoyado fervientemente mi progresión académica.

A mis compañeros, profesores, personal del DISA y del AI2 por su colaboración y disponibilidad para la consecución de este máster.

A mi tutor, Martín Mellado, por la paciencia, disponibilidad y comprensión que ha mostrado durante todo este periodo. Así mismo, a Carlos Blanes y Pablo Beltrán por asistirme en todos los problemas encontrados en este proceso.

A mi familia y pareja, por el apoyo constante e incondicional y por mostrarme el significado del trabajo duro, constante y diario.





## Contenido

1.	INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN .....	9
1.1.	Introducción .....	9
1.2.	Objetivos .....	9
1.3.	Justificación .....	10
2.	ESTADO DEL ARTE .....	11
2.1.	Sensores táctiles resistivos.....	19
2.2.	Sensores flexibles .....	21
2.3.	Agarres robóticos blandos .....	23
2.4.	Avances en la robótica .....	26
3.	ESTUDIO TEÓRICO .....	28
3.1.	Requerimientos generales de un agarre robótico en el sector alimenticio.....	28
3.2.	Normativa higiénica en el sector alimentario .....	29
3.3.	Sistema de agarre.....	30
3.4.	Sensorización.....	31
4.	SISTEMA DE AGARRE DEDO DE SILICONA Y SENSOR FLEXIBLE FABRICADO .....	32
4.1.	Diseño y fabricación de un dedo robótico blando .....	32
4.1.1.	Mezclado de la silicona .....	32
4.1.2.	Llenado de los moldes y secado.....	33
4.1.3.	Desmoldado y ensamblaje .....	34
4.2.	Diseño y fabricación de un sensor flexible.....	36
4.2.1.	Materiales a utilizar.....	36
4.2.2.	Proceso de fabricación .....	39
4.3.	Sistema de medición .....	40
4.4.	Datos obtenidos experimentalmente .....	44
5.	SISTEMA DE AGARRE DEDO DE SILICONA CON SENSOR INDUSTRIAL.....	49
5.1.	Sistema de medición .....	49
5.1.1.	FlexSensor .....	49
5.1.2.	Sensor de presión.....	52
5.2.	Datos obtenidos experimentalmente .....	54
6.	SISTEMA DE AGARRE DEDO DE POLIURETANO CON SENSOR INDUSTRIAL .....	59



---

6.1.	Sistema de medición .....	59
6.1.1.	Dedos de poliuretano.....	59
6.1.2.	Sistema de sujeción y accionamiento .....	59
6.1.3.	FlexSensor .....	60
6.2.	Datos obtenidos experimentalmente .....	61
7.	SENSORES FLEXIBLES PARA GUANTES BIÓNICOS.....	68
8.	RESUMEN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	74
9.	REFERENCIAS.....	76

## Índice de figuras

Figura 1. Aplicación dedo BioTAC.....	12
Figura 2. Esquema interno del dedo BioTAC.....	13
Figura 3. Distribución de los sensores táctiles .....	14
Figura 4. Área de contacto del sensor.....	19
Figura 5. Circuito eléctrico de una célula resistiva.....	19
Figura 6. Curva de Abbott .....	20
Figura 7. Guante con sensores flexibles incorporados .....	22
Figura 8. Estructura de los DEA .....	23
Figura 9. Ejemplos de agarre de elementos irregulares.....	24
Figura 10. Dedo DEMES.....	24
Figura 11. Agarre adaptativo DHDG de FESTO .....	25
Figura 12. Ejemplo de Pneunets.....	26
Figura 13. a) Materiales necesarios b) Mezcla realizada .....	33
Figura 14. Mezcla en vacío .....	33
Figura 15. Moldes llenos y desmoldado.....	34
Figura 16. 1) Protección cámaras 2) Ensamblaje 3) Dedo completado .....	35
Figura 17. Estructura interna del dedo .....	35
Figura 18. Cinta Americana .....	36
Figura 19. Velostat .....	37
Figura 20. Hilo conductor.....	38
Figura 21. Placa virgen .....	38
Figura 22. Cinta americana cortada .....	39
Figura 23. Pegado del hilo conductor .....	39
Figura 24. Pegado del Velostat.....	40
Figura 25. Sensor completado.....	40
Figura 26. a) Planta b) Soporte dedo-producto .....	41
Figura 27. Dedo de silicona en acción .....	41
Figura 28. Estructura DAQ USB6009 .....	42
Figura 29. Circuito de acondicionamiento del sensor fabricado.....	42
Figura 30. a) 32mm b) 36mm c) 40mm d) 42mm .....	43
Figura 31. Esquema de funcionamiento de la repetitividad .....	43
Figura 32. Esquema de funcionamiento para el modelado .....	44
Figura 33. Repetitividad en reposo del sensor fabricado.....	45
Figura 34. Repetitividad del sensor fabricado actuando sobre 40mm .....	45
Figura 35. Datos en reposo tras medir diferentes diámetros .....	46
Figura 36. Datos medidos al actuar sobre diferentes diámetros.....	46
Figura 37. Modelado del sistema de agarre propio .....	47
Figura 38. Comprobación del modelado según diámetros .....	48
Figura 39. Sensor flexible de Spectra Symbol .....	49
Figura 40. Funcionamiento del sensor flexible .....	50

Figura 41. Circuito de acondicionamiento del sensor industrial.....	51
Figura 42. Planta y perfil del sistema de medición .....	51
Figura 43. a) 50mm b) 53mm c) 57mm.....	52
Figura 44. a) Circuito de conexión b) Dimensiones.....	52
Figura 45. Rango de salida del sensor de presión .....	53
Figura 46. Modelado del sensor de presión.....	53
Figura 47. Repetitividad en reposo del sensor industrial.....	54
Figura 48. Repetitividad del sensor industrial actuando sobre 40mm .....	55
Figura 49. Datos en reposo del sensor industrial tras medir diferentes diámetros .....	55
Figura 50. Datos medidos con el sensor industrial al actuar sobre diferentes diámetros.....	56
Figura 51. Presión leída por el sensor modelado.....	57
Figura 52. Modelado dedo silicona/flex sensor .....	57
Figura 53. Comprobación del modelado según producto de 50 mm de diámetro.....	58
Figura 54. Dedo de poliuretano de FESTO .....	59
Figura 55. Sistema de agarre con dedos de poliuretano .....	60
Figura 56. Circuito eléctrico 4 sensores .....	61
Figura 57. Repetitividad en reposo del sensor industrial en dedo de poliuretano.....	62
Figura 58. Repetitividad del sensor industrial actuando sobre 50mm .....	62
Figura 59. Datos en reposo del sensor industrial tras medir diferentes diámetros en los dedos de poliuretano.....	63
Figura 60. Datos medidos por el sensor 1 al actuar sobre diferentes diámetros .....	64
Figura 61. Datos medidos con el sensor 2 al actuar sobre diferentes diámetros.....	64
Figura 62. Datos medidos por el sensor 3 al actuar sobre diferentes diámetros .....	65
Figura 63. Datos medidos por el sensor 4 al actuar sobre diferentes diámetros .....	65
Figura 64. Modelado dedo poliuretano con sensor industrial.....	66
Figura 65. Guante con sensores incorporados.....	69
Figura 66. Esquema de funcionamiento del guante .....	69
Figura 67. Esquema de toma de decisiones.....	70
Figura 68. Adquisición inicial de datos en reposo.....	71
Figura 69. Adquisición inicial de datos en 90°.....	71
Figura 70. Posición 0° .....	72
Figura 71. Posición 30° .....	72
Figura 72. Posición 60° .....	73
Figura 73. Posición 90° .....	73

## Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de los sensores táctiles .....	15
Tabla 2. Tecnologías de los sensores táctiles.....	18
Tabla 3. Modelado de los sensores flexibles según su posición .....	66
Tabla 4. Comprobación de los modelados realizados.....	66
Tabla 5. Tabla de codificación para la posición de la mano biónica .....	68



## 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

### 1.1. Introducción

Actualmente existen muchos procesos industriales que utilizan técnicas de agarre para realizar pick&place. El pick&place consiste en mover un objeto de un sitio a otro mediante un robot.

En los procesos industriales actuales los agarres suelen ser piezas rígidas que únicamente tienen como objetivo el agarre del objeto a manipular. Asimismo, la forma de obtener información característica de los productos agarrados se consigue mediante procedimientos de visión artificial. El inconveniente existente en la visión artificial es que no puede interactuar directamente con el objeto y los costes en cuanto a hardware y software puede incrementar considerablemente el precio del proyecto.

Estas desventajas provocan que se busque otro método de realizar el pick&place. Mediante la sensorización táctil, además de realizar un agarre menos agresivo, también sería posible obtener información detallada del producto a procesar a un precio muy asequible. A través de estos sensores se pretende estudiar características como la dureza, la rugosidad, el tamaño o el peso de un objeto.

Se define como táctil todo aquello que se percibe o se puede percibir a través del tacto, por tanto, los sensores táctiles aparecen con la finalidad de percibir características tal y como podría hacerlo el ser humano a través del tacto.

Destacar asimismo las posibilidades de avance que puede representar en diferentes campos como la medicina, el procesado de alimentos y la asistencia a mayores.

### 1.2. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo fin de máster es el desarrollo, trabajo y verificación de sensores táctiles para la manipulación de productos u objetos con robótica. Se pretende desarrollar dos aplicaciones para ello, la primera es una aplicación orientada al sector alimenticio, por lo que es necesario un estudio detallado con el fin de hacer un correcto agarre del producto, respetando sus cualidades y su higiene. En este caso, se busca desarrollar una aplicación que consiga no solo el agarre del producto sino también la caracterización del diámetro del producto a nivel milimétrico, con el fin de obtener información de la forma del mismo. La segunda aplicación consiste en un guante biónico capaz de ayudar a niños con muñón a controlar una mano biónica.

Si nos fijamos únicamente en la aplicación de la manipulación de alimentos es necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar un sistema de agarre no evasivo respecto al objeto a manipular.
- Aplicar una fuerza correcta al movimiento para un correcto agarre.
- Creación de un sistema de acople herramienta – agarre robótico blando.
- Seleccionar unos agarres robóticos blandos con la suficiente flexibilidad para acoplarse a la forma del objeto.
- Controlar el conjunto agarre y sensor.
- Comprender el funcionamiento de los sensores flexibles.
- Implementar una aplicación en LabView que muestre la información obtenida de la sensorización.
- Realizar los tratamientos de señales adecuados para una correcta lectura del proceso.
- Obtener información clara y concisa de los datos obtenidos.

Por el otro lado, los objetivos específicos del guante biónico son:

- Seleccionar la posición correcta de inserción de los sensores
- Elegir una funcionalidad correcta del guante teniendo en cuenta los resultados obtenidos por los sensores en la manipulación de objetos.
- Encriptar mediante bits las distintas posiciones del guante.
- Realizar un sistema de toma de decisiones según la posición del sensor para que luego pueda ser utilizado para aplicarlo a una mano biónica.

### **1.3. Justificación**

Al realizar el pick & place de un elemento, solo se obtiene el cambio del mismo de un punto a otro sin tener en consideración las características del elemento.

Por ello, mediante la sensorización táctil se pretende obtener la máxima información posible de un objeto de forma barata y eficaz mientras que se realiza el pick & place.

En nuestro caso, en primer lugar, la aplicación va a estar destinada a obtener información característica de productos alimenticios. Mediante la sensorización táctil, se realiza una aplicación para obtener el diámetro de los productos a tratar y así poder realizar una clasificación de los mismos dependiendo de este parámetro. En la segunda parte de este trabajo fin de máster, se profundizará en el desarrollo de guantes biónicos con sensorización táctil.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Actualmente, cuando se pretende diseñar un robot es deseable que éste tenga implementado capacidades que podrían ser humanas como puedan la visión o el tacto.

El sentido del tacto en humanos ha servido como principal fuente de conocimiento e inspiración para el desarrollo de la sensorización táctil robótica. Hay una importante distinción entre dos diferentes componentes en la percepción de contacto en humanos: la sensación kinético que se refiere a la percepción de movimiento del miembro y las fuerzas con receptores internos, mientras que la percepción cutánea es la percepción de información de contacto con receptores en la piel. A la hora de hablar de los sensores táctiles biológicos destacar que son sensores con gran histéresis, no lineales, variantes en el tiempo y lentos. En contraste, cuando se pretende diseñar un sistema robótico se requiere el uso de linealidad y sensores invariantes en el tiempo que solo respondan ante un único parámetro.

Los humanos tienen la habilidad de agarrar una gran variedad de formas y tamaños, desarrollar tareas complejas y cambiar la forma de agarre dependiendo de las tareas requeridas. Esto es debido en parte a la estructura física de nuestras manos (múltiples dedos con muchos grados de libertad), y en parte a nuestro control sofisticado de capacidades. Estas características se pueden encontrar en las sensorizaciones táctiles y de fuerza, especialmente la habilidad de sentir las condiciones de contacto dedo-objeto.

En las últimas dos décadas, los investigadores robóticos han trabajado para crear un sentido del tacto artificial para dar a los robots la misma capacidad de manipulación que tienen los humanos. Mientras que la visión ha recibido la mayor atención, el tacto es vital para muchas operaciones. La habilidad de manipulación requiere control de fuerzas y movilidad en el contacto entre los dedos y el entorno lo cual solo puede ser completado a través del tacto. El conocimiento de estos parámetros es esencial para que los robots agarren de manera fiable objetos desconocidos en entornos desordenados. En el caso de la sensorización táctil, el sensor tiene que estar en contacto con el objeto y este contacto debe ser perfectamente diseñado con el fin de extraer la máxima información posible del objeto a manipular

La sensorización táctil es un proceso que determina propiedades físicas de los objetos a través de su contacto con el mundo. Los sensores táctiles ofrecen posibilidades apasionantes para el uso en aplicaciones mecatrónicas y aparatos de medida en muchas áreas de la ciencia y la ingeniería. En robótica y en automatización industrial son las áreas de aplicación que han generado un mayor interés debido a que la interacción por contacto es fundamental. Sin embargo, hay muchas otras áreas de aplicación tales como la agricultura, el procesado de comida, la medicina o el ámbito doméstico.

La sensorización táctil tiene como principal finalidad conseguir obtener información del medio como se podría hacer a través del propio sentido del tacto humano. Es muy común ver experimentos donde se estudie la movilidad de las articulaciones o la obtención de información del medio relevante como podría ser la forma, la dureza o la rugosidad de un elemento. La sensorización táctil también se utiliza en procesos de manipulación de objetos correosos o desconocidos con ondulaciones que requieren mucha información del contacto.

Para entender mejor la evolución de la sensorización táctil, hay que hacer especial hincapié en campo de las “manos artificiales”. Se define como mano artificial al dispositivo multi-dedo activo o pasivo semejante en función o forma a una mano humana. Este campo de estudio surgió a principios del siglo XXI y se centró principalmente en mejorar la habilidad y las capacidades de agarre de las manos protésicas. En el primer lustro de este siglo, los investigadores demostraron que las desventajas como el tiempo de computación y la calibración pueden ser satisfactoriamente resueltas y la tecnología ofrece ventajas como la durabilidad, la portabilidad y la facilidad de mantenimiento. En el segundo lustro, se buscó soluciones al hecho de sus limitaciones en cuanto a robustez o en algunos entornos. Se propuso entonces un sensor táctil compuesto por una base rígida con electrodos distribuidos sobre su superficie. El sensor está cubierto de una “piel” de material elastómero que la hace resistente. Este sensor recibe el nombre de BioTAC. En el último lustro, los estudios se han enfocado en la habilidad de detectar fenómenos dinámicos con la intención de asemejarse a los mecanorreceptores de los humanos.



Figura 1. Aplicación dedo BioTAC

El dedo BioTAC está formado por varios sensores y elementos que simulan la formación de los dedos humanos. Los sensores que tiene en su interior le da la capacidad

de medir las fuerzas de contacto, las vibraciones, la temperatura y el flujo de calor. El esquema interno es el siguiente:

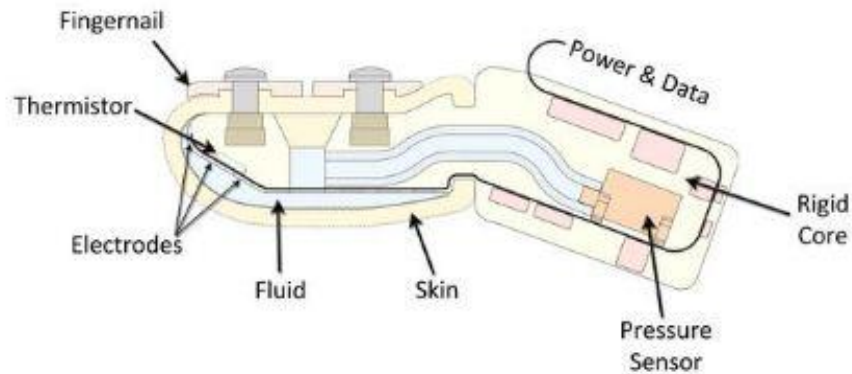


Figura 2. Esquema interno del dedo BioTAC

Se define un sensor táctil como un aparato o sistema que puede medir una propiedad de un objeto o el contacto físico entre el sensor y el objeto. Los sensores táctiles aportan a los robots maneras adicionales de sentir los objetos que se están manipulando. Por ejemplo, se puede detectar si el robot está en contacto con un elemento o no. El modelado geométrico mediante sensores táctiles está basado en un contacto que determina cómo la superficie de contacto del sensor y el objeto interactúan. El resultado de esta interacción se registra y se cuantifica mediante el sensor táctil pudiendo así obtener una estimación del modelo geométrico de la superficie del objeto.

Un buen sensor táctil debería poseer, como la piel humana, suavidad, elasticidad y algo de resistencia mecánica. Otro aspecto deseable de los sensores táctiles artificiales podría ser la habilidad de identificar diferentes materiales basándose en su conductividad térmica. Muchos han sido los materiales y las técnicas utilizadas a la hora de realizar sensores táctiles pero ninguno de ellos han sido completamente satisfactorios en términos como la robustez, la fiabilidad, el coste, la sensibilidad, el ruido, la histéresis, la no linealidad o la fatiga

El sensor que ha recibido más atención es el “tactile array”, que simula la sensorización distribuida de la piel humana. Estos sensores normalmente consisten en elementos presión-sensitivos individuales colocados en una matriz rectangular sobre la superficie de contacto de la punta del dedo. Tal como los objetos entran en contacto con el sensor, el desplazamiento o la presión en cada elemento individual se mide, lo cual proporciona conocimiento de la forma superficial o de la distribución de la presión a través del contacto entre el dedo del robot y el objeto.

Otro sensor táctil importante es el sensor fuerza-par de la punta del dedo. Este es una célula de carga multi-eje montada justo debajo de la punta del dedo que mide las tres componentes de fuerza y par. Este sensor no mide al detalle la distribución de la presión de contacto, pero sí la fuerza neta y los vectores del par a través del contacto con el objeto. En principio, cualquier tipo de célula de carga multi-eje podría ser usada para la sensorización fuerza-par. Las especificaciones de diseño de estos sensores incluyen dureza, histéresis, calibración, amplificación y robustez.

Por último, los sensores táctiles dinámicos son útiles en tareas de manipulación complejas. Estos sensores responden a los cambios en las condiciones de contacto, al igual que la mano humana.

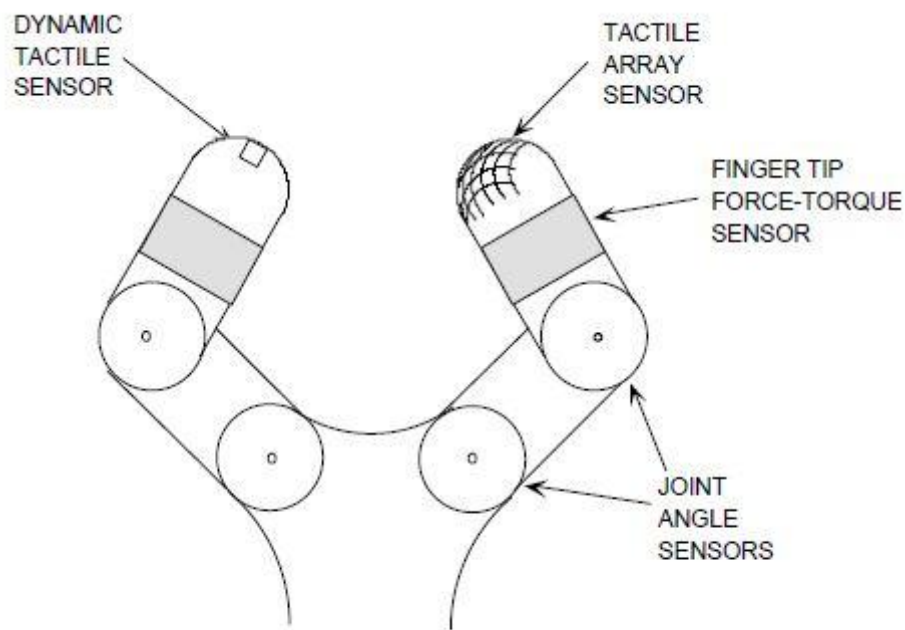


Figura 3. Distribución de los sensores táctiles

A la hora de diseñar un sensor táctil hay que tener dos factores importantes en cuenta. Uno es el tipo de aplicación y el otro el tipo de objeto con el que se va a contactar. Cuando el objeto a contactar es blando el diseño del sensor será más complejo que en el caso de uno duro. Los mecanismos robóticos blandos tienen ventajas sobre los tradicionales que son duros como por ejemplo que son por naturaleza seguros y ligeros. Además, estos mecanismos destacan por su alto grado de elasticidad, son robustos ante los impactos y colisiones y pueden ser diseñados y construidos a un bajo precio.

Los sensores táctiles es una de las familias de sensores más variadas debido a que están basados en diferentes propiedades físicas. Están implementados bajo diferentes

tecnologías y están instalados en el robot en diferentes configuraciones. Una clasificación de estos sensores puede ser:

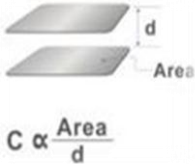


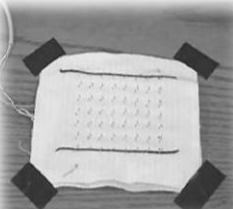
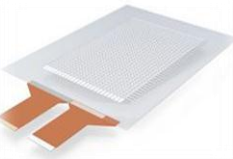

Tipos de sensores	Tecnologías	Propiedades físicas	Configuración del robot
Sensores de presión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacitivo</li> <li>- Piezorresistivo</li> <li>- Óptico</li> </ul>	Estático (presión normal)	Extrínseco
Sensores de deflexión del revestimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gomas conductoras</li> <li>- Galgas de presión piezorresistivas</li> <li>- Óptico</li> </ul>	Estático (deformación)	
Sensores de dinámica táctil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transductores piezoeléctricos</li> <li>- Acelerómetros</li> <li>- Sensores piezoeléctricos de estrés</li> </ul>	Dinámicos (vibración, estrés)	
Sensores de fuerza/par en la punta del dedo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Galgas de presión piezorresistivas</li> </ul>	Estático (fuerza/par)	Intrínseco

Tabla 1. Clasificación de los sensores táctiles

Los sensores táctiles pueden ser clasificados en 2 grandes grupos según sus propiedades de medida: sensores táctiles estáticos o dinámicos. Los sensores táctiles estáticos analizan las propiedades físicas de dos superficies de contacto estáticas mientras que los dinámicos están basados en el estudio de la variación de las propiedades físicas de 2 superficies de contacto que se están moviendo. Por un lado, los sensores táctiles estáticos están generalmente basados en la medida de la presión sobre una superficie de contacto o su deformación. Por otro lado, los sensores táctiles dinámicos miden las vibraciones o los cambios de estrés en las superficies de contactos para así determinar cuándo disminuyen la distancia entre estas superficies.

Los sensores táctiles pueden instalarse en el robot según dos configuraciones principales: intrínseco y extrínsecos. Los sensores táctiles intrínsecos están integrados dentro de la estructura del robot mientras que los extrínsecos están instalados en la superficie del robot. Los sensores táctiles intrínsecos se utilizan en manos robóticas y están basados en los sensores de fuerza/par de la punta del dedo con galgas de presión que miden las fuerzas y los pares aplicados sobre la última falange de cada dedo. Si la geometría de la punta del dedo es conocida, la fuerza y el par obtenidos pueden ser usados para calcular la posición de los puntos de contacto.

En referencia a la tecnología utilizada se puede clasificar:

Método de medida	Ventajas	Desventajas	Ejemplos
Capacitivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede ser flexible</li> <li>- Gran rango dinámico</li> <li>- Sensibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Histéresis</li> <li>- Ruido</li> <li>- Resolución limitada</li> </ul>	
Inductivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta sensibilidad</li> <li>- Repetitividad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construcción compleja</li> <li>- Interferencias (Electrónica alrededor)</li> <li>- Resolución baja</li> </ul>	
Resistivo: área de contacto deformable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexible</li> <li>- Fino</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Histéresis</li> </ul>	
Resistivo: Conductivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexible</li> <li>- Robusto</li> <li>- Simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incapaz de resolver más de un punto de contacto</li> </ul>	
Resistivo: QTC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilidad</li> <li>- Gran rango dinámico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Histéresis</li> <li>- Absorción de gases</li> </ul>	
Resistivo: Galga de presión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilidad</li> <li>- Gran rango dinámico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voluminoso</li> <li>- Caro</li> </ul>	



Resistivo: Polímero Conductivo Piezorresistivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fino</li> <li>- Barato</li> <li>- Simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Histéresis</li> <li>- Rígido</li> </ul>	
Resistivo: Piezo-MEMS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pequeño</li> <li>- Multi-elemento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran número de cables</li> </ul>	
Resistivo/Capa- citivo: Canales líquidos embebidos en un elastómero	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pequeño</li> <li>- Flexible</li> <li>- Capacidad de medir la fuerza multidimensionalmente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran número de cables</li> </ul>	
Polímero- MEMs (multimodal)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mide 6-GDL de fuerza</li> <li>- Buen conductor de calor</li> <li>- Temperatura</li> <li>- Rugoso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran número de cables</li> <li>- Complejidad de conexión</li> </ul>	
Piezoeléctrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Detecta la dinámica de texturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo detecta eventos dinámicos</li> <li>- Sensibilidad térmica</li> </ul>	
Óptico: Video Procesado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resolución muy alta</li> <li>- Sensibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Computacionalmente complicado</li> <li>- Sensible a la luz ambiental</li> </ul>	
Óptico: Resistivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexible</li> <li>- Baja histéresis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fabricación compleja</li> </ul>	

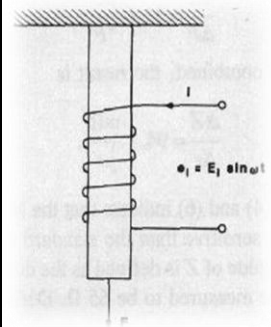
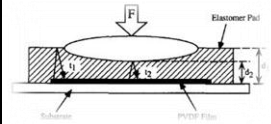
Magneto-elástico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muy sensible</li> <li>- Baja histéresis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensible a campos magnéticos externos</li> </ul>	
Magneto-resistivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Robusto</li> <li>- Sensible</li> <li>- Baja histéresis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ruidoso</li> </ul>	
Ultrasonido	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede resolver información estática y dinámica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto voltaje</li> <li>- Electrónica compleja</li> </ul>	

Tabla 2. Tecnologías de los sensores táctiles

Dentro de los sensores táctiles, se pueden estudiar varias tecnologías. Las más importantes son:

Los sensores ópticos utilizan la fuerza relativa a la absorción o la reflexión de los haces de luz. Son insensibles a la corrosión y a perturbaciones magnéticas aunque no son recomendables para usar en grandes áreas.

Los sensores capacitivos utilizan el cambio de capacitancia entre dos electrodos que cubren un dieléctrico deformable. Dado que estas variaciones son muy pequeñas, es necesario un circuito de acondicionamiento muy complejo. Además es muy sensible a las perturbaciones electromagnéticas.

Los sensores táctiles resistivos están basados en el efecto que tiene la resistividad cuando dos superficies cambian por el efecto de una fuerza aplicada.

Cada una de las tecnologías de los sensores táctiles como por ejemplo la piezorresistiva, la piezoeléctrica, la capacitiva o la óptica tienen ciertas desventajas como su baja resolución, no flexibilidad, susceptibilidad al ruido o su histéresis. Con el fin de mejorar estos puntos, apareció un material denominado “quantum tunneling composite” (QTC). Este material pasa de aislante a conductor cuando se comprime, se retuerce o se le aplica alguna tensión. QTC se usa como material base en el desarrollo de sensores táctiles flexibles capaces de detectar todo tipo de fuerzas.

## 2.1. Sensores táctiles resistivos

Fabricados actualmente mediante polímeros conductores piezorresistivos. Los sensores resistivos son muy robustos en situaciones de sobrepresión, shock y vibraciones debido a su complejión flexible. Normalmente, los electrodos para detectar la resistencia están montados en la cara del sensor coaxialmente a la dirección donde se va a aplicar la carga como indica la figura 4.

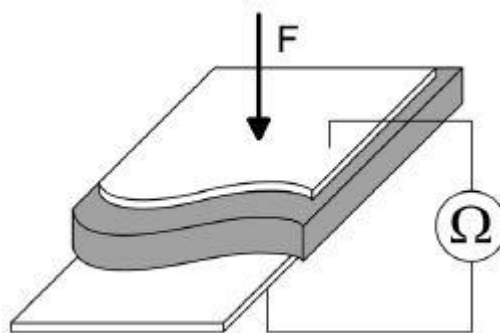


Figura 4. Área de contacto del sensor

Cuando existe un contacto por los dos lados del material, el electrodo superior está expuesto a un estrés indeterminado reduciendo así el tiempo de vida del sensor.

Desde el punto de vista eléctrico, la resistencia de salida consiste en tres resistencias.  $R_v$  es la resistividad volumétrica del material entre los electrodos que se puede asumir como constante.  $R_s$  es la resistencia que aparece en la superficie que varía cuando se le aplica una carga. El circuito eléctrico se indica en la figura 5.

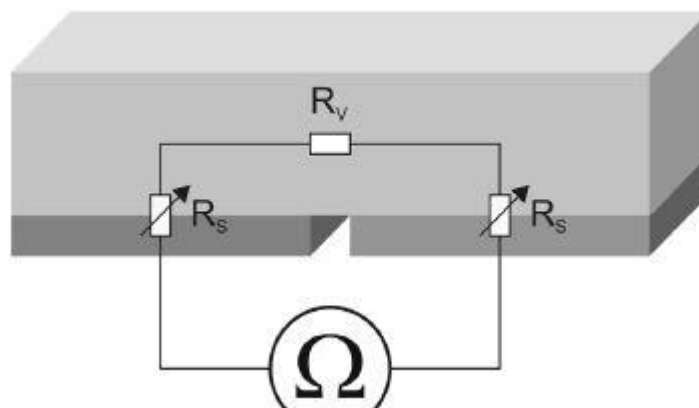


Figura 5. Circuito eléctrico de una célula resistiva

Para realizar un modelo matemático del sensor seguiremos las siguientes demostraciones:

La ley de Hooke proporciona la relación entre la fuerza aplicada  $F$  y la deformación  $\varepsilon$  de un cuerpo elástico, donde  $E$  es el módulo flexor y  $A$  es el área de la sección.

$$F = EA\varepsilon \quad (1)$$

Integrando (1) se obtiene la energía de deformación interna  $\Pi$  del cuerpo

$$\Pi = \int EA\varepsilon \cdot d\varepsilon \quad (2)$$

De acuerdo con el teorema de la energía, la energía de deformación es igual al trabajo externo  $W$

$$W = \frac{1}{2} f \cdot F \quad (3)$$

Siendo  $f$  la deformación de la superficie del sensor y  $F$  la fuerza externa aplicada.

Para modelar la capa entre el electrodo y el material del sensor, se introduce una función área  $A(\varepsilon) = [0,1]$ . Esta función devuelve la curva de Abbott del sensor, la cual permite calcular numéricamente la función área a través de la fuerza externa  $A(F)$ .

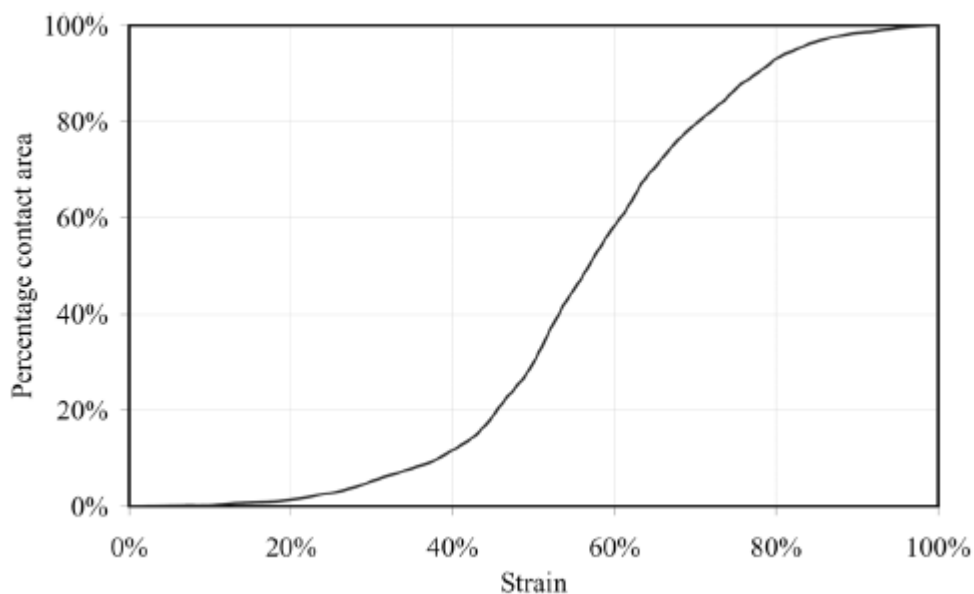


Figura 6. Curva de Abbott

Utilizando esta función, se puede expresar la resistencia  $R_S$  como una función de la fuerza aplicada y la resistividad de la superficie del material del sensor  $R_{SO}$ .

$$R_S(F) = \frac{1}{A(F)} \cdot R_{SO} \quad (4)$$

Teniendo ahora una relación entre la fuerza aplicada y la resistencia  $R_S$ , se puede expresar la resistencia eléctrica  $R$  de nuestra galga como una suma de sus resistencias elementales

$$R(F) = 2R_S + R_V \quad (5)$$

Donde  $R_V$  es la resistividad volumétrica del sensor a través del electrodo.

## 2.2. Sensores flexibles

Hay muchos ejemplos en el uso de sensores flexibles, la mayoría de ellos relacionados con la monitorización de los movimientos de la mano humana. A continuación, se detalla algunos de ellos:

- En la universidad de la Salle, en Filipinas han realizado un experimento por el cual se consigue traducir algunas palabras procedentes del lenguaje de signos. En el mismo, experimentan con palabras relacionadas con el ámbito de la medicina para conseguir que el paciente sordomudo, pueda explicar al doctor la dolencia correspondiente. Para ello, se fabricó un guante en el que se sitúa uno de estos sensores en cada dedo como se muestra en la figura 7. Dada la posición de cada uno de los dedos, se realiza una encriptación que se traduce en la palabra que se quiere decir. Mediante esta técnica, se consigue que el sistema reconozca correctamente el 80% de los gestos que se registran. También es importante recalcar que gran parte de los errores vienen dados por el hecho de que algunas de las palabras tienen un parecido razonable y se produce confusiones en las lecturas.

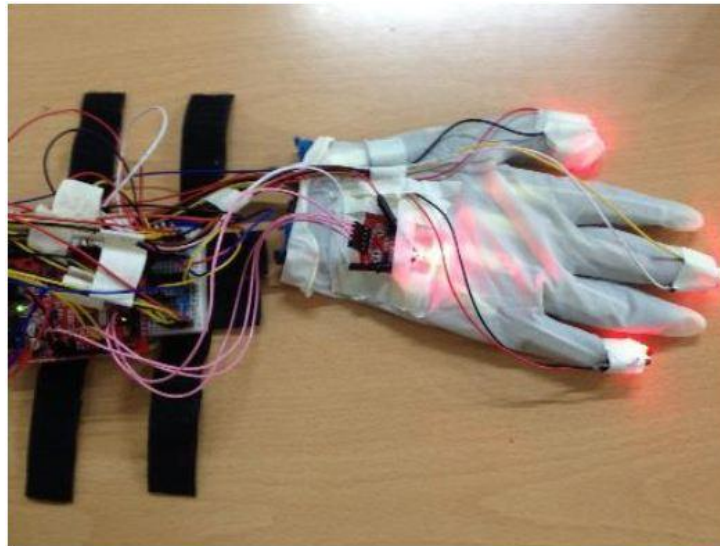


Figura 7. Guante con sensores flexibles incorporados

- Por otro lado, en la universidad de Jadavpur de la India, se ha trabajado con estos sensores con el fin de realizar un sistema de llamada para personas con dificultad en la movilidad o discapacitados físicos. El sistema consiste en un guante en el cual se sitúa un sensor flexible en uno de sus dedos. Cuando la lectura de este sensor llega a una posición determinada debido a la flexión que realiza el paciente, el sistema envía una señal de aviso.

El problema que supone este experimento es que no se puede diferenciar esta señal de aviso con una tarea habitual que pueda realizar el paciente, como por ejemplo cuando es levantado de la cama.

Como se ha podido comprobar en los ejemplos anteriores, la fiabilidad de estos experimentos es limitada. Es por ello que mediante este trabajo, se ha buscado llevar a cabo experimentos con estos sensores con el fin de estudiar si es posible mejorar sus capacidades y resultados. Conociendo así su capacidad de mejora, hacer una aproximación de su resolución y la fiabilidad del mismo en diferentes situaciones.

### 2.3. Agarres robóticos blandos

Las manos robóticas blandas tienen varias ventajas sobre las manos robóticas duras tradicionales. La elasticidad adicional de estas manos robóticas blandas confiere una mayor robustez intrínseca ante lo desconocido, permite un amplio rango de objetos fácilmente manipulables y un mayor cuidado a la hora de interactuar con el entorno estático.

Un inconveniente común en las manos blandas es que debido a su elasticidad, la configuración de la mano en un momento dado es desconocida, especialmente cuando interactúa con objetos o con el entorno. Conocer la configuración de la mano es esencial para la toma de decisiones durante el proceso de manipulación. La configuración de la mano puede ser útil para determinar si un agarre va a ser satisfactorio, si un agarre es robusto y si el objeto se ha situado en la posición deseada. La configuración de la mano también puede ser útil para determinar la forma de un objeto agarrado por la mano.

Dado que se pretende utilizar los sensores flexibles vistos en el apartado 2.2., hay que diseñar un sistema de agarre, en el cual se puedan incorporar estos sensores. Para ello, se busca utilizar un procedimiento denominado SoftGripping que consiste en un sistema de agarre por deformación que se adapta al objeto a tratar. A continuación, se detallan varios ejemplos que podrían ser de utilidad para este procedimiento:

- Actuadores dieléctricos elastómeros (DEA)

Son una clase de polímeros electro-activos que se extiende cuando se aplica una tensión sobre ellos. El actuador está compuesto por el polímero ensamblado entre dos placas de electrodos. Cuando se aplica una tensión aparece un campo eléctrico que produce que el polímero se haga más fino y se ensanche.

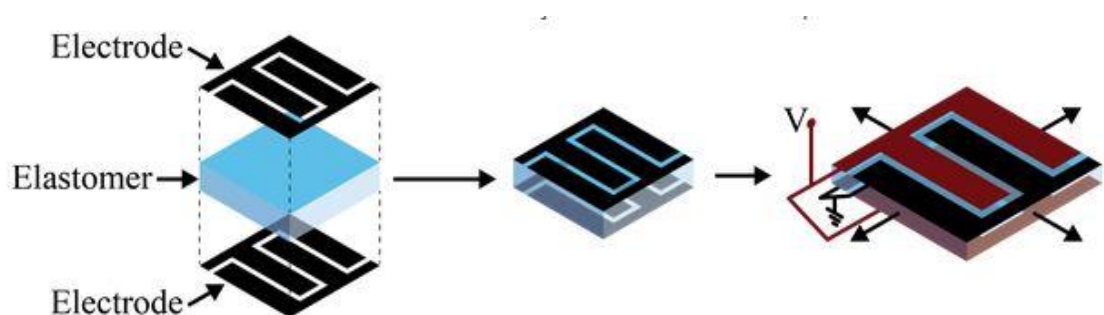


Figura 8. Estructura de los DEA

Los materiales elastómeros son aquellos materiales que están formados por polímeros que se encuentran unidos mediante enlaces químicos, adquiriendo una estructura final ligeramente reticulada. Las propiedades de los materiales elastómeros son:

- No se pueden derretir, antes de derretirse pasa a un estado gaseoso.
- Se hinchan ante la presencia de ciertos solubles.
- Generalmente insolubles
- Son flexibles y elásticos
- Menor resistencia al fenómeno de fluencia que los termoplásticos

Dentro de ésta clase, existen varios tipos. Uno de ellos es el DEA basado en la autoadhesión. Este sistema nos permite manipular objetos que son deformables o frágiles de cualquier forma con una única señal de control.

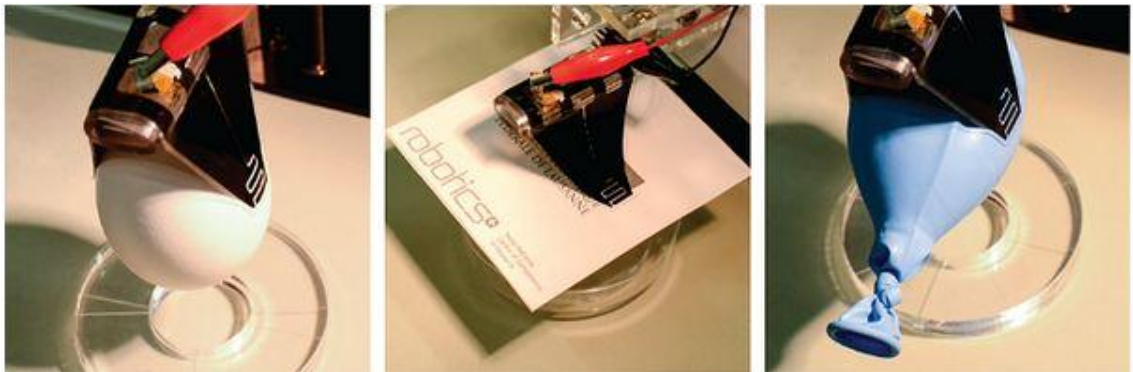


Figura 9. Ejemplos de agarre de elementos irregulares

Otro ejemplo es el denominado DEMES. El DEMES es capaz de producir una gran elongación y está basado en un músculo artificial. Al aplicar una tensión, el DEMES se cierra sobre sí mismo, pudiendo así abrazar el objeto a tratar.

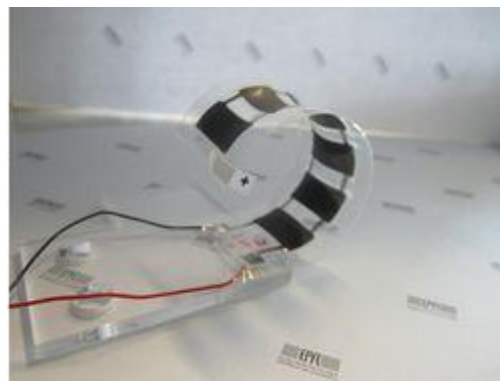


Figura 10. Dedo DEMES



- Agarre adaptativo DHDG de FESTO

Consiste en agarres que simulan los dedos humanos, haciendo que el agarre de objetos sea delicado. De estos sensores destacar su larga vida útil y su versatilidad para adaptarse a diferentes formas y contornos. Destacar asimismo que su precio es 80% más barato que un sistema normal de agarre debido al material utilizado. Son utilizados en varias aplicaciones como puede ser el agarre de productos alimenticios, para cribar objetos con diferentes formas o máquinas de interacción humana en sistemas de cuidados médicos.



Figura 11. Agarre adaptativo DHDG de FESTO

- PneuNets

Es el nombre que reciben los mecanismos neumáticos (Pneumatic networks). Son una clase de actuadores blandos formados por una serie de canales y cámaras dentro de un elastómero. Estos canales se llenan de aire cuando se les presuriza creando así la forma correspondiente.

La naturaleza del movimiento se controla modificando la geometría de las cámaras embebidas y las propiedades del material de sus paredes. Cuando uno de estos actuadores se presuriza, la expansión ocurre en las regiones menos rígidas,

es decir, la parte con estructura más delgada es la que sufrirá mayor cambio. Esto permite que los diseñadores puedan pre programar el comportamiento del actuador seleccionando el espesor de las paredes que conseguirán el movimiento deseado.



Figura 12. Ejemplo de PneuNets

#### 2.4. Avances en la robótica

Los sensores táctiles pueden ser de ayuda cuando se pretende agarrar objetos irregulares o el agarre en entornos industriales desordenados. A continuación se detallan varios campos en los que el desarrollo de sensores táctiles puede ser de gran ayuda:

- Cirugía y medicina

Los sensores táctiles pueden dar información acerca de las propiedades de dureza, viscosidad y elasticidad de los órganos. Esto ayudará a localizar tumores, órganos funcionando de manera anormal y a darle al cirujano una monitorización táctil. También existen avances en campos como la traducción de personas sordomudas o aviso de emergencias en personas minusválidas.

En el campo de la cirugía cabe destacar el MIS (Minimally Invasive Surgery) que proporciona mucha información del estado de los tejidos y los órganos sin la necesidad de introducir las manos del cirujano. La cirugía robótica nos proporciona varios beneficios como pueda ser la reducción del estrés en los cirujanos, la reducción de la duración de las operaciones y la reducción del tiempo de recuperación del paciente.

Un paso más avanzado es el robot-asistido MIS (RMIS). Este procedimiento tiene más beneficios que el MIS ya que incluye mejoras en visión 3D y mejora la destreza ayudando así al cirujano.

En el campo de la ingeniería protésica los sensores táctiles pueden analizar la distribución de presión en las articulaciones y conocer así la presión que debe soportar la prótesis. El uso de sensores en miniatura para estudiar estas fuerzas se convierte en una mejora en los campos de las prótesis y ortopedia.

- Cuidados y servicios

El cambio demográfico de los países desarrollados demandará un mayor uso de la robótica para el apoyo de la población envejecida. El problema principal a desarrollar es la necesidad de operar con objetos irregulares de todo tipo de texturas y composición. La principal desventaja es la de crear un sistema cuyo coste pueda ser usado por la mayoría de la sociedad.

- Agricultura y procesado de comida

Existe la necesidad de reducir el riesgo de higiene, eliminar la contaminación y prevenir de los errores humanos. En el caso del procesado de comida, el proceso de producción requiere de un alto número de operadores humanos. Esto es debido a que hay que trabajar con elementos blandos, delicados y de tamaños variables, es por ello, que la sensorización táctil adquiere importancia porque podría realizar la misma tarea. En factorías de baja temperatura donde los alimentos se conservan mejor, el uso de sensores táctiles puede ayudar a agarrar, manipular o procesar elementos blandos como fruta, dulces y elementos alimenticios diversos. Los elementos del robot deben ser capaces de sensorizar la dureza, la textura y las propiedades de la superficie.

- Robots de movilidad autónoma

Esta área está creciendo muy rápido y el requerimiento de seguridad absoluta es su principal restricción. Existe bajo supervisión humana en aplicaciones donde la operatividad autónoma es un riesgo como coger un contenedor o cosechar automáticamente.

### 3. ESTUDIO TEÓRICO

En este trabajo fin de máster se pretende realizar agarres robóticos mediante sensores táctiles. La aplicación de este procedimiento está orientada al sector alimenticio. Este hecho produce que el proceso sea más restrictivo ya que los elementos a manipular no pueden sufrir, en general, cambios en su estado y tiene que ser muy restrictivo en cuanto a la higiene.

#### 3.1. Requerimientos generales de un agarre robótico en el sector alimenticio

Los productos alimenticios requieren agarres y embalajes delicados ya que suelen ser muy frágiles y fácilmente se pueden echar a perder. Hoy en día, la mayoría de agarres y envasados son realizados por los operadores humanos. Los humanos pueden aportar un alto grado de destreza y flexibilidad, lo cual permite que pueda ser aplicable a una gran variedad de productos alimenticios ya que todos los productos a tratar pueden tener variaciones en cuanto a color, textura, forma y tamaño. Sin embargo, según se ha ido endureciendo la legislación en cuanto a la higiene, el coste de la mano humana se ha encarecido considerablemente y es ahí donde aparecen los agarres robóticos. De hecho, estos sistemas son capaces de realizar las funciones anteriores con gran precisión y menos tiempo que los humanos.

La principal función de un agarre robótico es tener la habilidad de realizar la tarea que se le propone. Esto incluye tanto la precisión como el movimiento del brazo robot. Otra de las principales razones por la que se usan los agarres robóticos es su repetitividad. Con ello se consigue repetir una misma acción sin cambios. Otro punto es el poco desgaste que sufren estos procedimientos, reduciendo considerablemente los costes de mantenimiento.

Por último, destacar la ventaja que dan los agarres robóticos en cuanto a seguridad laboral. En este campo hay que realizar procesos de prevención conociendo los posibles daños que puedan sufrir tanto el sistema como los productos a tratar.

### 3.2. Normativa higiénica en el sector alimentario

En el sector alimenticio, todos los procesos tienen que tener unos requisitos de higiene que se tienen que cumplir obligatoriamente, a continuación se detallan los más importantes que pueden afectar a nuestro proceso:

- La zona de trabajo estará protegida frente al exterior para evitar contaminaciones.
- Cada zona estará preparada para mantener una temperatura adecuada según la naturaleza del producto.
- Los equipos de trabajo no serán susceptibles de corrosión, tendrán un buen comportamiento mecánico y un adecuado acabado de la superficie.
- El sistema debe ser adecuado tanto al lugar y al puesto de trabajo como al elemento a manipular.

Todos estos aspectos expuestos anteriormente, exponen la necesidad de hacer un correcto diseño del sistema con la finalidad de cumplir con la normativa higiénica vigente. Es por ello, que a la hora de diseñar el sistema de agarre se tengan en cuenta diferentes aspectos teniendo en cuenta que se va a trabajar con productos de alimentación.

- El sistema de agarre debe conseguir una manipulación óptima del alimento. Esto conlleva que el agarre toque la menor cantidad posible de alimento, respetando las características del mismo y consiguiendo que el producto no sufra alteraciones durante el proceso.
- El agarre tiene que ser de un material que no sea evasivo al alimento. Por ejemplo, actualmente se ha extendido el uso de polímeros.
- Hay que evitar en la medida de lo posible que componentes mecánicos o electrónicos entren en contacto con el alimento.

### 3.3. Sistema de agarre

Debido a que vamos a tratar con productos alimenticios, se debe seleccionar un sistema que cumpla ciertas especificaciones preferentemente:

- Dado que se pretende tener el mínimo contacto con el sensor, lo más correcto sería seleccionar un agarre de tipo pinza o de dedo. Estos sistemas se caracterizan por no cubrir toda la superficie del producto y así disminuir el riesgo de cambiar sus características iniciales a través del proceso de manipulación.
- Es preferible el uso de un material flexible ya que podría ser capaz de adquirir la forma del producto. Mediante este procedimiento se consigue que sea el agarre el que coja la forma del producto manteniendo así todas sus características. Si el agarre es duro, el producto puede sufrir deformaciones que hacen que su estado inicial pueda cambiar.
- Hay que prestar mucha atención a la fuerza que se le aplica al agarre. Si la fuerza es demasiado alta, aun usando agarres blandos, se podrían producir aplastamientos del producto, realizando así un agarre erróneo. Es por ello, que hay que aplicar una fuerza adecuada para poder agarrar el producto sin dañarlo en ningún momento.
- El agarre tiene que poseer mucha robustez. Los agarres en el sector alimenticio se caracterizan por el gran número de repeticiones que tienen que realizar de un mismo proceso. Por ello, tiene que estar sometido previamente a pruebas de fatiga con el fin de conocer cómo afecta el paso del tiempo al dispositivo.
- Los dedos tienen que estar a una distancia adecuada entre ellos cuando se produce el agarre. Si están demasiado cerca pueden aplastar el producto incluso si la fuerza aplicada es muy pequeña y si están demasiado lejos pueden no llegar a agarrar el producto correctamente. Por ello, se necesita una buena relación entre la distancia entre dedos y la fuerza que se le aplica al movimiento.
- Otro punto importante a destacar es el conocimiento del producto a tratar. Hay productos alimenticios que no sufren modificaciones en su estructura cuando se deforman (carne) pero hay otros que con una fuerza de agarre desproporcionada podrían romperse y echarse a perder (fruta). Este punto es muy importante a la hora de diseñar la fuerza a aplicar y la distancia entre dedos.

En el mercado de agarres, hay una gran variedad de sistemas de agarres que se han utilizado durante épocas como pueden ser los agarres por pinzas, succión o dedos rígidos. Pero en la última década han aparecido nuevos sistemas como pueden ser el jamming o el los dedos blandos. Estos nuevos procedimientos realizan unos agarres mediante métodos no destructivos.

### **3.4. Sensorización**

A la hora de realizar la sensorización, se pretende buscar unos sensores que se acoplen perfectamente al sistema de agarre expuesto anteriormente. Los sensores deben formar parte del sistema con una estructura lo más simple posible y con una electrónica lo más reducida que se pueda para optimizar el espacio. Es necesario el desarrollo de sensores que se puedan adaptar al sistema de agarre tanto en movilidad, es decir, que acompañen el movimiento del dedo, como en el trato del producto. Como se ha expuesto anteriormente sobre la higiene, se intentará evitar que los componentes electrónicos estén en contacto directo con el producto.

Por todo ello, es recomendable el uso de sensores que puedan ser relativamente flexibles para poder acompañar todo el movimiento del sistema. También sería una buena solución que el sensor fuera capaz de ajustarse fácilmente al dedo sin necesidad de diseñar una estructura mecánica compleja.

A nivel electrónico, es preferible el uso de un sensor que no requiera de fuente de alimentación. El uso de una fuente de alimentación elevaría considerablemente la cantidad de electrónica en el sistema, tanto en dispositivos como en cableado. Lo ideal sería encontrar un sensor que variase su resistencia cuando se le aplique una condición física determinada y que la tensión al sistema pueda ser proporcionada con una simple tarjeta de adquisición de datos.

## 4. SISTEMA DE AGARRE DEDO DE SILICONA Y SENSOR FLEXIBLE FABRICADO

En primer lugar, se va a diseñar un sistema completo de agarre robótico blando con sensorización incluida. Por tanto, hay que diseñar y fabricar por un lado el dedo robótico blando y por otro lado, el sensor que se va a utilizar.

### 4.1. Diseño y fabricación de un dedo robótico blando

Para esta aplicación se decide el uso de dedos robóticos blandos debido a su complejidad flexible. Ésta característica permitirá que el dedo se acople correctamente al elemento a manipular mediante un método no destructivo.

Por tanto, se decide realizar un dedo a partir de la tecnología de PneuNets vista en el apartado 2.3. El proceso de fabricación consiste en el uso de una silicona que se seca al ser rellanada en unos moldes 3D prefabricados. A continuación se detalla el procedimiento a seguir para fabricar dicho sensor:

#### 4.1.1. Mezclado de la silicona

La silicona que se va a utilizar es la denominada ELASTOSIL M-4601 que consiste en dos componentes, parte A (roja) y la parte B (blanca). Ésta silicona está aprobada por la Administración de alimentos y medicamentos (FDA), lo que hace que éste permitida para el contacto con alimentos. Estos componentes se tienen que mezclar a escala 1:9 y se tienen que usar en menos de 30 minutos. Es importante respetar al detalle estos puntos para conseguir una silicona suficientemente dura. Por tanto, se decide hacer la mezcla en un vaso y se introduce 10 gramos del componente A y 90 gramos del componente B y se remueve hasta conseguir una mezcla completamente homogénea.





Figura 13. a) Materiales necesarios b) Mezcla realizada

Una vez tenemos la mezcla hecha, la silicona se sitúa dentro de una cámara de vacío para reducir las burbujas de aire que se han quedado dentro durante el proceso de mezcla. Cuando se aplica el vacío, las burbujas se hacen más grandes y pueden ser explotadas mediante una aguja consiguiendo así una mezcla con muy pocas burbujas de aire.



Figura 14. Mezcla en vacío

#### 4.1.2. Llenado de los moldes y secado

Tras el proceso de vacío, la mezcla de silicona se introduce en el molde seleccionado hasta arriba. Con el fin de evitar nuevas burbujas, se introducen los moldes rellenos en la cámara de aire de nuevo. Una vez terminado este proceso, se deja el molde a secar. Este tipo de silicona endurece a temperatura ambiente en aproximadamente 1 día.

El molde seleccionado para esta aplicación es el de un dedo que se adapta al proceso de doblado. Con este diseño se pretende asemejar a la forma de agarrar de la mano humana. Cuando una mano agarra un objeto, primero pone la palma y luego cierra los dedos. Esta forma de actuar es implementada en el dedo teniendo diferentes velocidades de doblado que se consigue mediante cámaras de aire con diferentes tamaños. Como el diseño es triangular, primero se doblaran las cámaras del principio del dedo y luego las del final.



Figura 15. Moldes llenos y desmoldado

#### 4.1.3. Desmoldado y ensamblaje

Desmontar la silicona del molde es un proceso complejo debido a la fuerza que hay que aplicar para desmoldar. Hay que aplicar la fuerza justa para poder retirar la silicona sin romper ni la silicona ni el molde.

Una vez tenemos la parte de arriba y la de abajo desmoldada, continúa el proceso con el ensamblaje de las dos partes. Para pegar ambas partes es necesario realizar un poco más de la mezcla de silicona que funcionara como pegamento para unir dichos elementos. También se debe colocar un palo entre ambas capas. Este palo tiene como función mantener un orificio abierto por el cuál se introducirá el aire comprimido y se conseguirá así el movimiento del dedo.

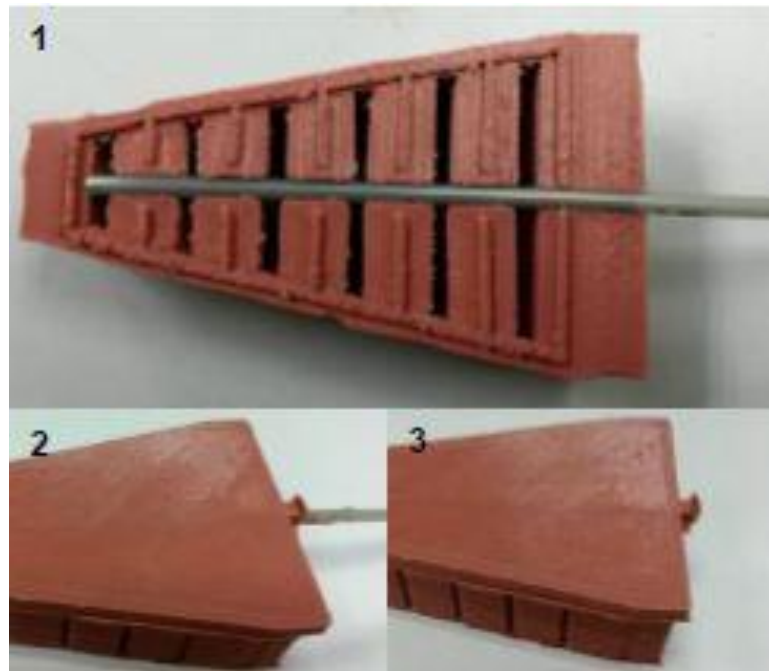


Figura 16. 1) Protección cámaras 2) Ensamblaje 3) Dedo completado

Una vez ensamblado todo el dedo y secado de nuevo, se retira el palo y ya se puede introducir el tubo de aire comprimido.

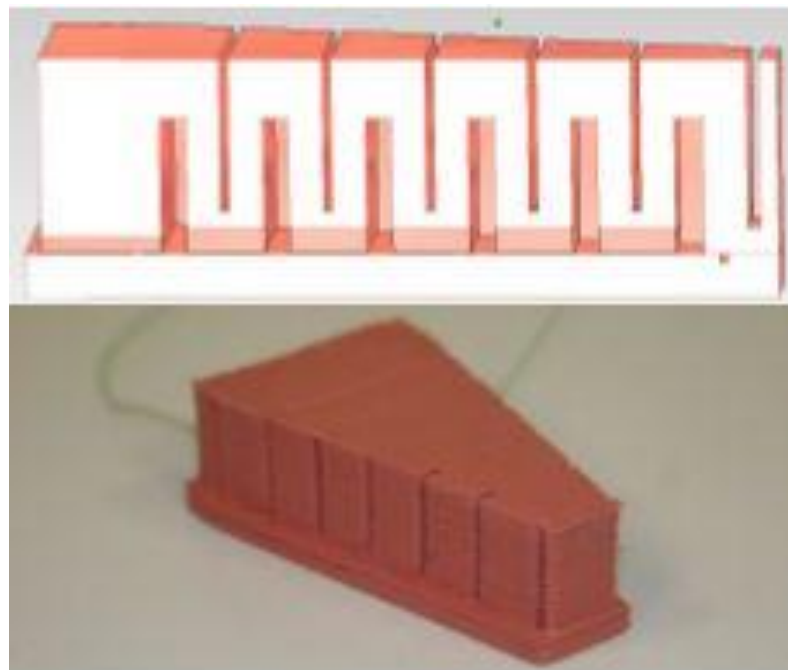


Figura 17. Estructura interna del dedo

## 4.2. Diseño y fabricación de un sensor flexible

Para completar el sistema de agarre, se pretende colocar un sensor flexible en el dedo fabricado anteriormente y así intentar medir los diámetros de los productos a procesar.

### 4.2.1. Materiales a utilizar

- Cinta americana

La cinta americana, conocida también como cinta de tela, cinta tapa ducto, cinta plateada, "teipe" gris o cinta multipropósito, es un tipo de cinta adhesiva que se caracteriza por añadir una malla o hilado de fibras naturales o sintéticas parecida a una venda como refuerzo. El resultado es una cinta fácil de cortar con las manos, impermeable al agua y al aire, más fuerte y resistente a la tracción y presión que otras cintas y que tiene múltiples usos.



Figura 18. Cinta Americana

- Velostat

Velostat es un material piezorresistivo, lo que quiere decir que su resistencia eléctrica disminuya cuando es presionado. Cuando se encuentra entre dos cables conductores, tiene mucha capacidad para la fabricación de sensores de presión y flexibles.

Velostat es bidireccional, opaco, conductivo y está impregnado en carbón poliolefino. Las características eléctricas no se ven afectadas por los años o la humedad pero sí cambian si se suelda con el hierro.

Velostat es el nombre que se le ha dado a este material manufacturado por 3M. Linqstat es lo mismo solo que fabricado por otra compañía, Caplinq.

Destacar también que es mucho más barato que cualquier sensor de presión o de curvatura. Es muy importante a la hora de manipularlo conseguir que siempre este bien estirado, es decir, sin pliegues.

Los detalles técnicos del Velostat son:

- Dimensiones: 280mm x 280mm y 0.1mm de espesor
- Peso: 18.66g
- Límites térmicos: de -45°C a 65°C
- Resistividad volumétrica: menor de 500  $\Omega$ /cm
- Resistividad superficial: menor de 31000  $\Omega$ /sq\*cm



Figura 19. Velostat

- Hilo conductor

Consiste en un hilo conductor tejido de fibras de acero inoxidable. Lo que diferencia este hilo con otros tipos de conductores es que no tiene un núcleo de nylon. Esto significa que no se pueden soldar debido a que son inoxidables pero así mismo, no pueden quemarse. Se puede usar tanto en

máquinas de costura como en costura manual. Su textura rugosa proporciona fabricaciones muy herméticas.

La resistencia que proporciona es de  $91.86 \Omega/m$ .



Figura 20. Hilo conductor

- Placa virgen

Consiste en una plancha base aislante (cartón endurecido, bakelita o fibra de vidrio) de diversos espesores. El espesor más común es de 2mm, y sobre la cual se ha depositado una fina lámina de cobre que está firmemente pegada a la base aislante.

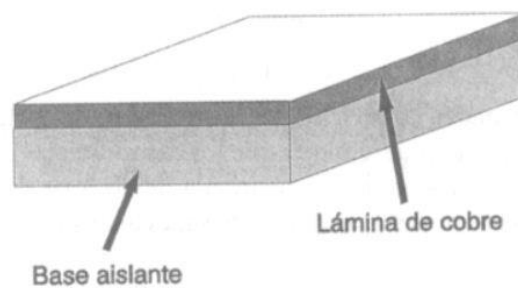


Figura 21. Placa virgen

#### 4.2.2. Proceso de fabricación

En primer lugar, se cortan dos trozos de cinta americana idénticos. La cinta americana forma parte del exterior del sensor.

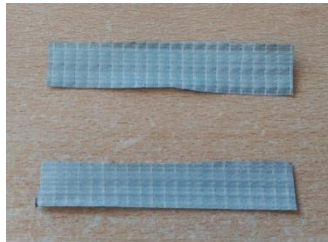


Figura 22. Cinta americana cortada

A continuación, se ponen dos elementos en una de las puntas que sirva para tratar la cinta aislante sin necesidad de que se pegue en los dedos. Tras esto, se coloca el hilo conductor sobre la superficie de la cinta americana, dejando que sobresalga por uno de los lados.

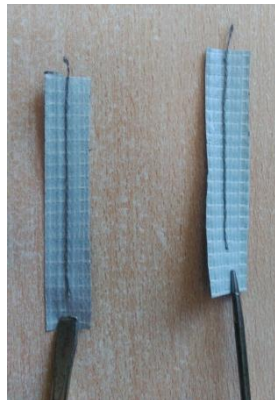


Figura 23. Pegado del hilo conductor

El siguiente paso es colocar un trozo de placa virgen en los extremos para poder facilitar así la manipulación del hilo conductor. Tras esto, se coloca el Velostat el cual debe ser un poco más pequeño que la superficie de la cinta americana.

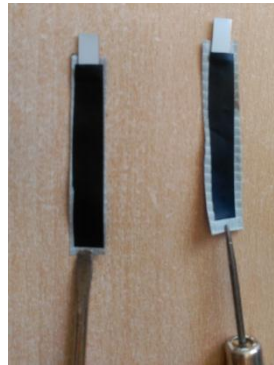


Figura 24. Pegado del Velostat

Por último, se coloca otra capa de Velostat en uno de los lados únicamente y se pegan ambas partes en sentido opuesto, quedando así un polo a cada lado del sensor.



Figura 25. Sensor completado

#### 4.3. Sistema de medición

Una vez se tiene tanto el dedo robótico blando como el sensor fabricado, se busca realizar un sistema que nos permita hacer mediciones con cierta fiabilidad. En primer lugar, se une el sensor al dedo mediante un sistema que no afecte al dedo cuando éste está actuando. Además se realiza una estructura mediante impresión 3D que tiene una doble funcionalidad. Por un lado, hacer de sujeción fija del dedo cuando esté actuando y por otro lado, poder sujetar el producto a tratar.



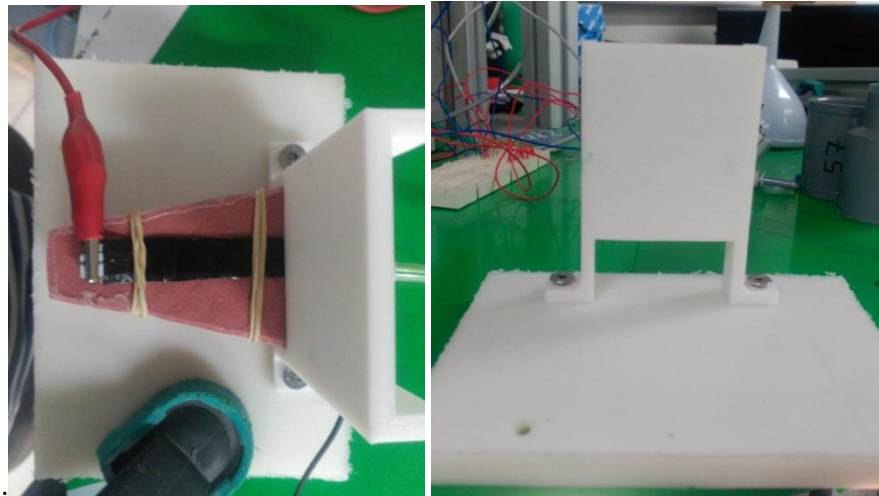


Figura 26. a) Planta b) Soporte dedo-producto

Una vez se tienen todos los elementos mecánicos, el proyecto se centra en la funcionalidad del sistema. Por un lado, se tiene el dedo robótico blando de silicona. Su funcionamiento se basa en el llenado o vaciado con aire comprimido de sus cámaras. Éste dedo se dobla según la cantidad de presión que se le aplica. La presión máxima aplicable es de 1,2 bares, si se le aplica una presión mayor se puede correr el riesgo de que se deforme hasta una forma no deseada o incluso se rompa. Es por ello, que para asegurar que el dedo sea capaz de coger un producto y abrazarlo en la mayor superficie posible, se decide aplicar 1 bar de presión. Esta presión se proporciona mediante un regulador de presión.



Figura 27. Dedo de silicona en acción

Por otro lado, hay que realizar el circuito electrónico para el sensor flexible. Dado que la adquisición de datos la vamos a hacer mediante computador, se puede utilizar una tarjeta de adquisición de datos tanto para adquirir la señal como para dar tensión al sistema. La tarjeta de adquisición de datos seleccionada es la USB6009 de National Instruments. Tiene una resolución de 32 bits, pudiendo conectar entre 13 y

14 dispositivos de lectura a la vez. La alimentación de la misma es de 10V mediante cable USB.

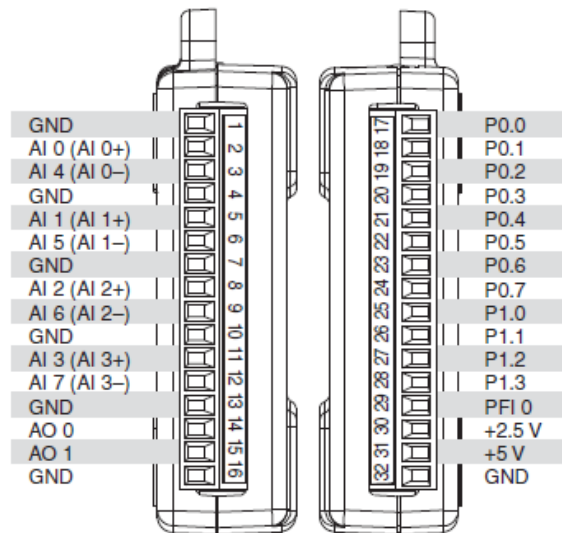


Figura 28. Estructura DAQ USB6009

Así se puede dar tensión al divisor de tensión que se va a realizar para obtener los datos del sensor y que se forma de la siguiente manera:

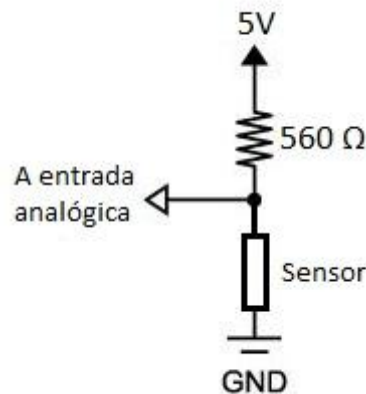


Figura 29. Circuito de acondicionamiento del sensor fabricado

Cuando se cierra del todo el dedo, el diámetro que podría medir sería de 25 mm. mientras que por su complejión, no varía mucho su posición a partir de los 50 mm. Así pues, el rango de posibles diámetros que debe ser capaz de medir es de entre 25 y 50 mm. Para realizar las pruebas no se utilizan productos del ámbito alimenticio sino materiales rígidos para poder hacer un modelado fiable de los sensores. A continuación se puede ver los materiales usados y los diámetros que tienen:

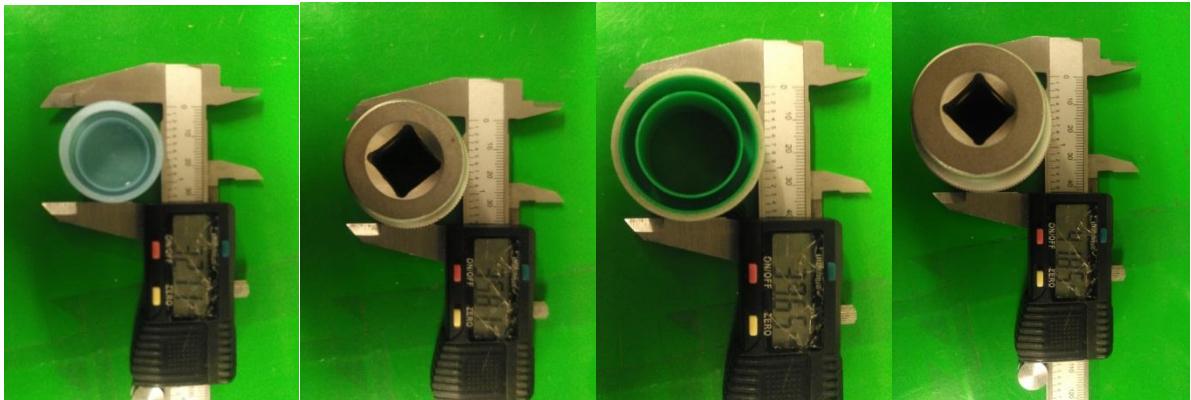


Figura 30. a) 32mm b) 36mm c) 40mm d) 42mm

Para finalizar, sólo falta implementar el sistema de control por computador del sistema. Para ello se va a utilizar el software Labview. Labview es un entorno de programación gráfico. Los programas se dividen en una interfaz con el usuario y el panel de programación. Mediante este software, se va a recopilar los datos obtenidos mediante la adquisición de datos y se van a tratar de tal manera que se consiga una señal estable y obtener de la misma la información característica que se pretenda del objeto a manipular.

En primer lugar se desea comprobar la repetitividad de los sensores. Para realizarlo, se va a estudiar cómo es su comportamiento a través del tiempo, tanto en reposo como cuando está manipulando un objeto. A continuación se detalla el diagrama de funcionamiento:

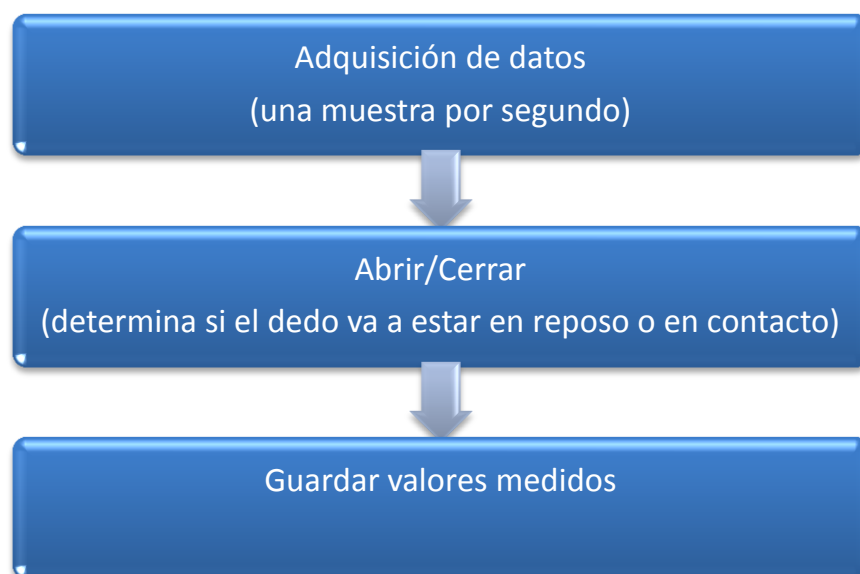


Figura 31. Esquema de funcionamiento de la repetitividad

Por otro lado, se va a realizar la adquisición de datos para hacer el modelado de los sensores. El funcionamiento que sigue este proceso es el siguiente:

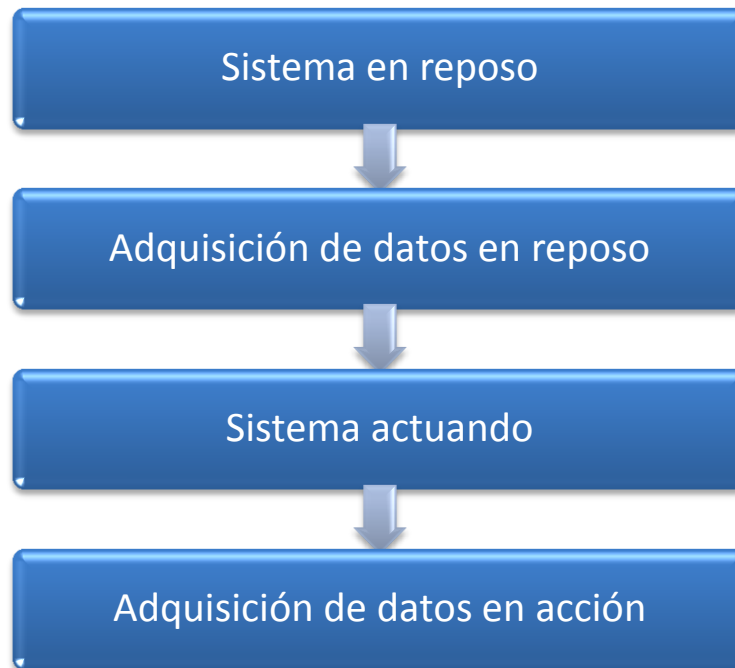


Figura 32. Esquema de funcionamiento para el modelado

#### 4.4. Datos obtenidos experimentalmente

En primer lugar, como se ha visto en el apartado anterior, se va a estudiar la repetitividad del sensor, concretamente en reposo. En este caso, se lee el sensor en reposo durante 5 minutos (300 muestras) obteniendo los siguientes resultados:

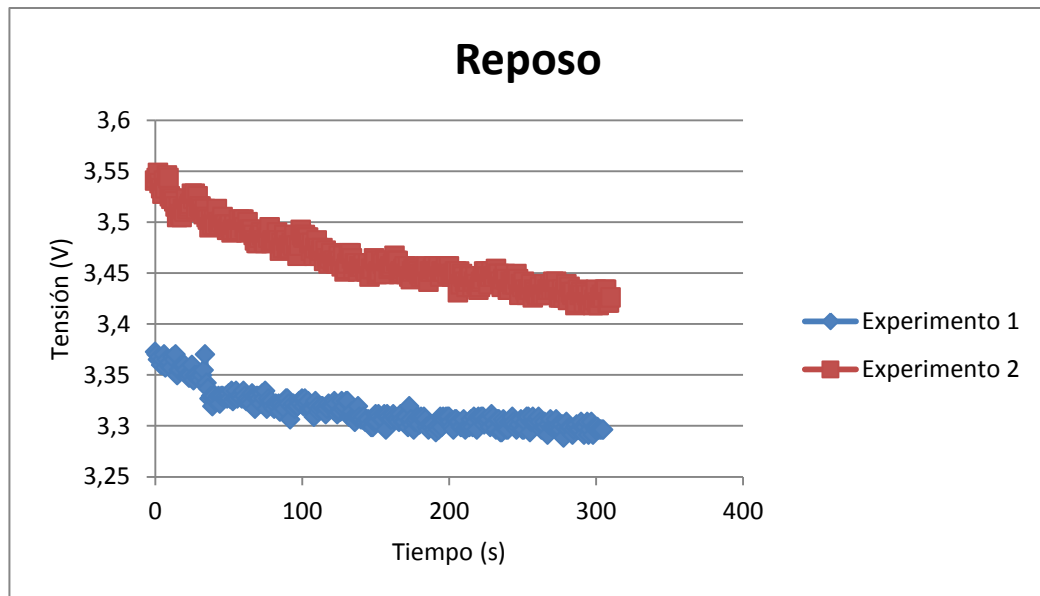


Figura 33. Repetitividad en reposo del sensor fabricado

A continuación, se va experimentar la repetitividad cuando está actuando. Así pues, se actúa sobre el elemento de 40 mm (celo) con una presión constante por parte del dedo robótico blando durante 10 minutos (600 muestras).

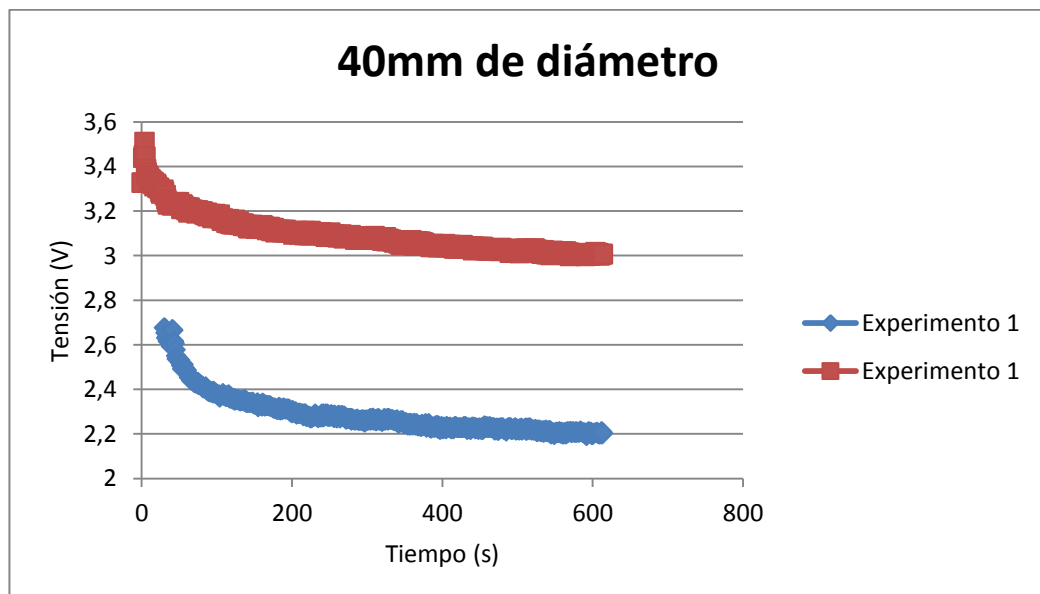


Figura 34. Repetitividad del sensor fabricado actuando sobre 40mm

Como se puede comprobar en ambos casos, el sensor pierde tensión con el paso del tiempo. Ésta pérdida de tensión es bastante significativa ya que en reposo puede llegar a perder una décima de voltio y actuando puede incluso perder medio voltio. Nótese que medio voltio es una cantidad demasiado grande para el rango que

tiene que es de alrededor de 1V en el mejor de los casos. Además contiene ruido pero no es problema en comparación a la pérdida de tensión.

A priori, los datos obtenidos no son muy buenos, sin embargo, se procede a intentar realizar un modelado utilizando los objetos detallados anteriormente. La forma de operar en este caso es cogiendo 10 datos del sensor cuando está actuando sobre cada objeto y estudiando su estado tanto en acción como cuando vuelve al reposo:

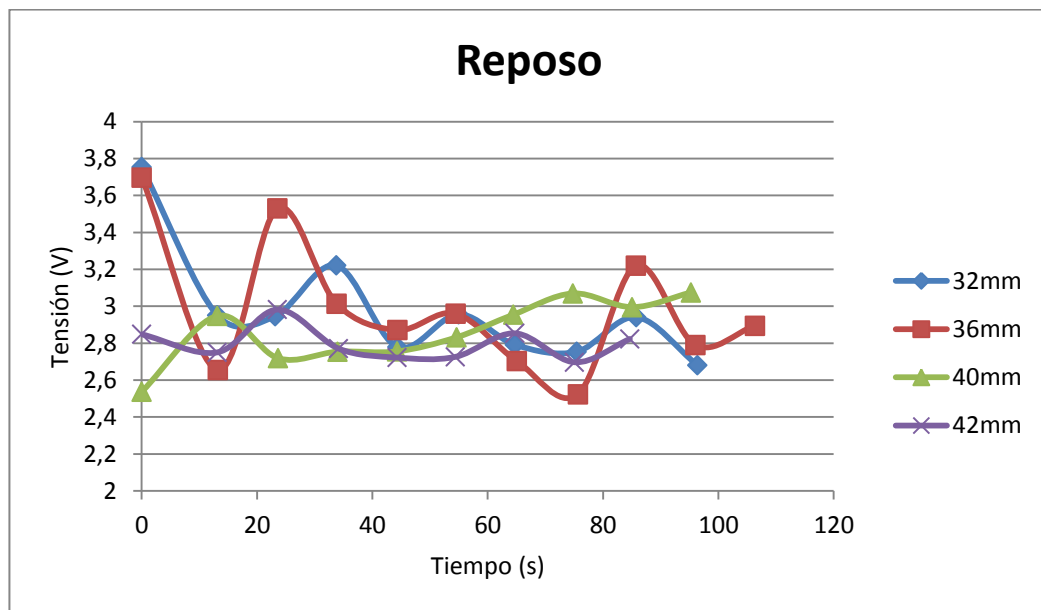


Figura 35. Datos en reposo tras medir diferentes diámetros

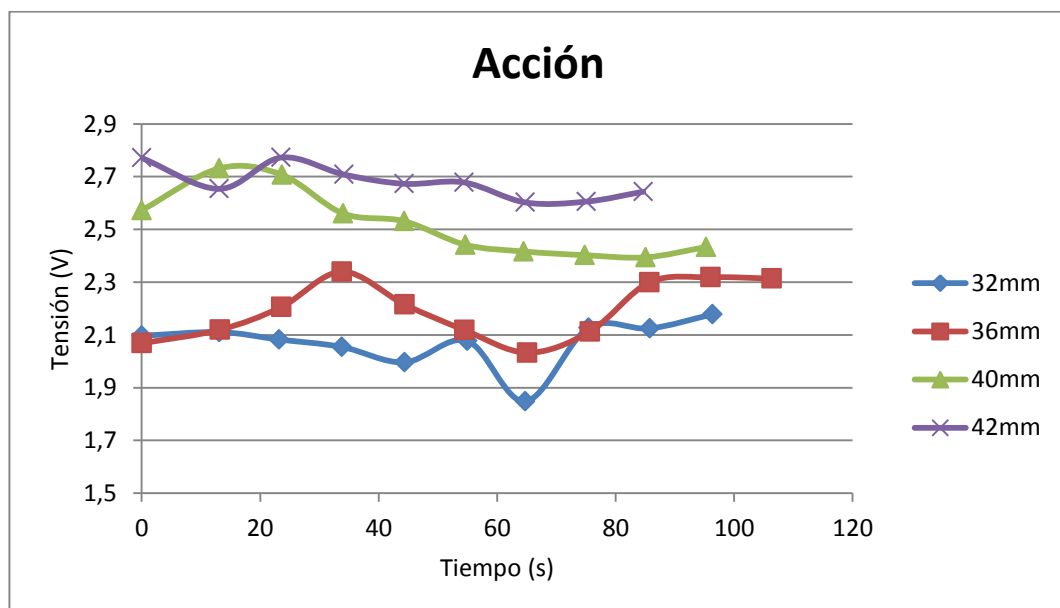


Figura 36. Datos medidos al actuar sobre diferentes diámetros

En el reposo, se puede observar que el sensor tiene muchos problemas para volver a una posición de reposo eléctrico constante. En el caso de cuando está actuando, se puede comprobar como la tensión es menor cuánto más pequeño es el diámetro, esto es debido a que la resistividad se reduce cuánto más se dobla el sensor. El problema principal de este caso es la histéresis que presentan las medidas, que puede sobrepasar los 300 mV.

A partir de los datos del sensor cuando está actuando, se realiza la media de dichos datos y se realiza el modelado:

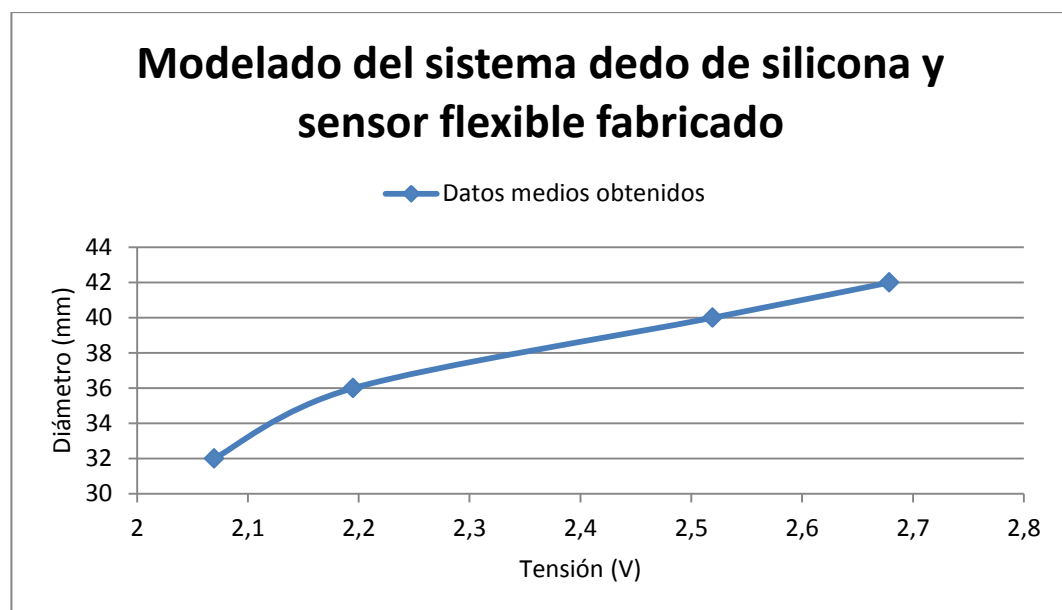


Figura 37. Modelado del sistema de agarre propio

Como se puede comprobar, el modelado no es completamente lineal, por tanto, se necesita hacer una aproximación lineal a la recta obtenida, obteniendo el siguiente modelo matemático:

$$y = 15,429x + 1,0024 \quad (6)$$

$$R^2 = 0,9614$$

El valor  $R^2$  es un número de 0 a 1 que indica en cuanto se corresponden los valores estimados con los datos reales. Por tanto, con ésta aproximación lineal se consigue a priori una fiabilidad del 96%.

A partir de este modelado, se realiza la comprobación del mismo para conocer si la aproximación realizada tiene la suficiente fiabilidad:

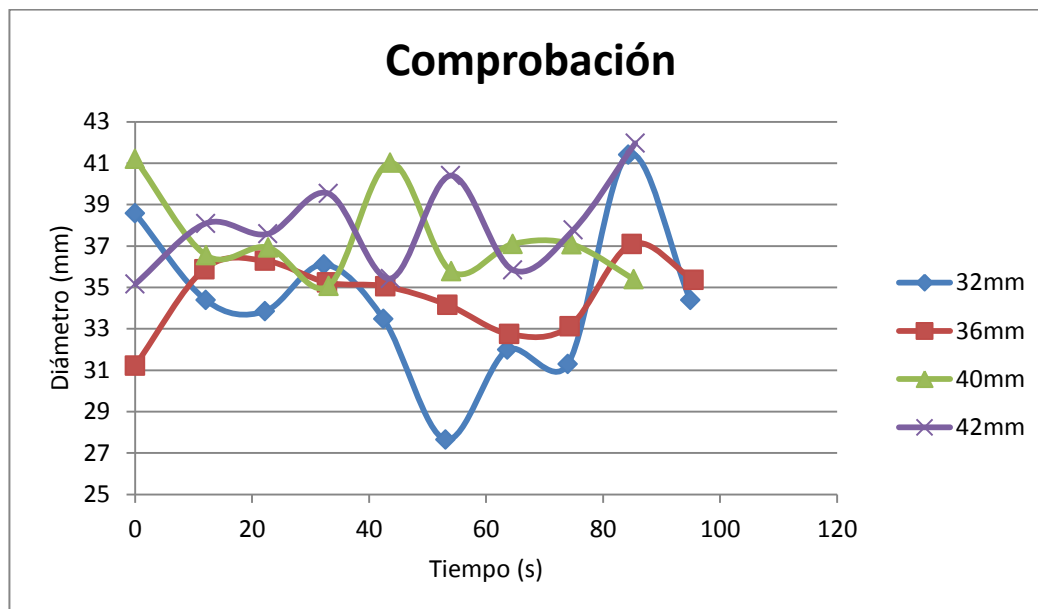


Figura 38. Comprobación del modelado según diámetros

Como se puede comprobar, los resultados no dan una fiabilidad en los resultados ya que en algunos casos existen errores que pueden llegar incluso al 40%. Por ello, se determina que es muy complejo el estudio del diámetro de productos mediante este sistema.

Como resumen, estos sensores flexibles destacan por ser bidireccionales, es decir, da lo mismo que cara se encuentre en contacto con el producto. Cuando se dobla, su resistencia disminuye y por consiguiente, la tensión también. El rango de medición del sistema es de entre 25 y 50 mm. de diámetro. Estos sensores destacan por su mala repetitividad y por su gran histéresis.



## 5. SISTEMA DE AGARRE DEDO DE SILICONA CON SENSOR INDUSTRIAL

Dado que el sensor visto previamente no da unos resultados deseables, se decide sustituirlo por un sensor industrial para conocer si existe mejora respecto al fabricado manualmente.

### 5.1. Sistema de medición

El sistema de medición es idéntico al utilizado anteriormente pero con un par de modificaciones que se detallan a continuación:

#### 5.1.1. FlexSensor

El sensor seleccionado para realizar este experimento es el denominado “FlexSensor” construido por Spectra Symbol.

En este caso, el sensor flexible es un sensor que al sufrir una deformación por flexión, su resistencia aumenta. El principio de funcionamiento entonces es contrario al sensor fabricado anteriormente.

Uno de los lados del sensor está impreso con una tinta polimérica que tiene partículas conductoras embebidas al mismo. Cuando el sensor sufre una deformación, las partículas conductoras se separan respecto a su estado inicial, aumentando así su resistencia. Cuando se cesa la deformación, el sensor vuelve a su estado de reposo y con ello, a la resistividad inicial. Destacar que para realizar una lectura correcta, es necesario que las partículas conductoras se expandan. Se produce una lectura incorrecta si las partículas se contraen.

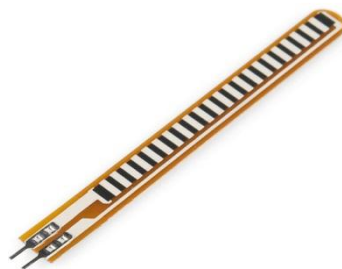


Figura 39. Sensor flexible de Spectra Symbol

Este sensor destaca por tener un ciclo de vida de más de un millón de esfuerzos y soporta una temperatura en un rango entre  $-35^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ . Este rango de temperaturas permite que pueda funcionar en ambientes diversos de temperatura como pueden existir en el campo de la alimentación. En cuanto a las especificaciones eléctricas, destacar las siguientes:

- Resistencia en reposo:  $10\text{ k}\Omega \pm 30\%$
- Resistencia en flexión: Mínimo dos veces más grande que la resistencia en reposo cuando se dobla  $180^{\circ}$

Para entender mejor el funcionamiento de este sensor, se adjunta la figura siguiente:

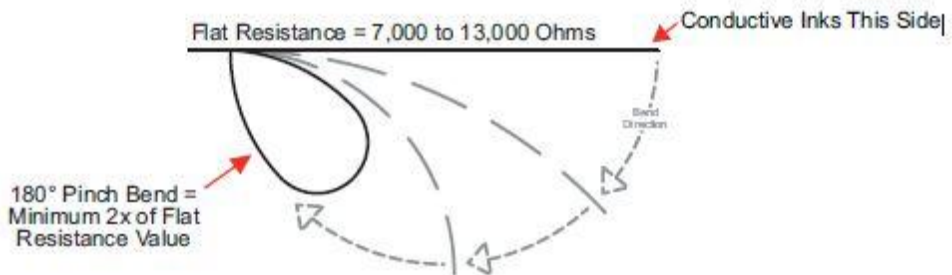


Figura 40. Funcionamiento del sensor flexible

Aunque el sensor presenta una estructura robusta, los pines de conexión son finos y pueden romperse si se le aplica una deformación muy grande, por lo que podría producirse un fallo. Por ello, es recomendable asegurar el área ante una posible sobretensión si existe el fallo del sensor. La manera más simple de hacerlo es mediante un divisor de tensión. Dado que este sensor tiene una variación en su resistividad respecto al fabricado, se debe modificar el divisor de tensión. Esto requiere de una resistencia de valor entre  $10\text{ k}\Omega$  y  $100\text{ k}\Omega$ . Por tanto, la configuración final de esta etapa se muestra en la figura 41.

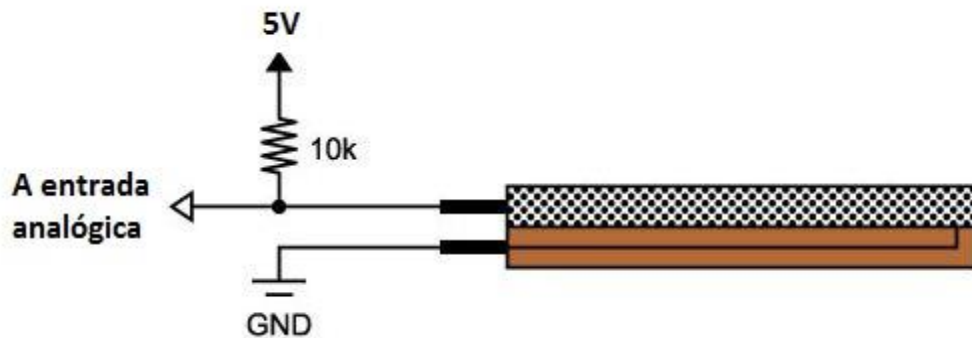


Figura 41. Circuito de acondicionamiento del sensor industrial

Por tanto, el sistema de medición queda de la siguiente manera:

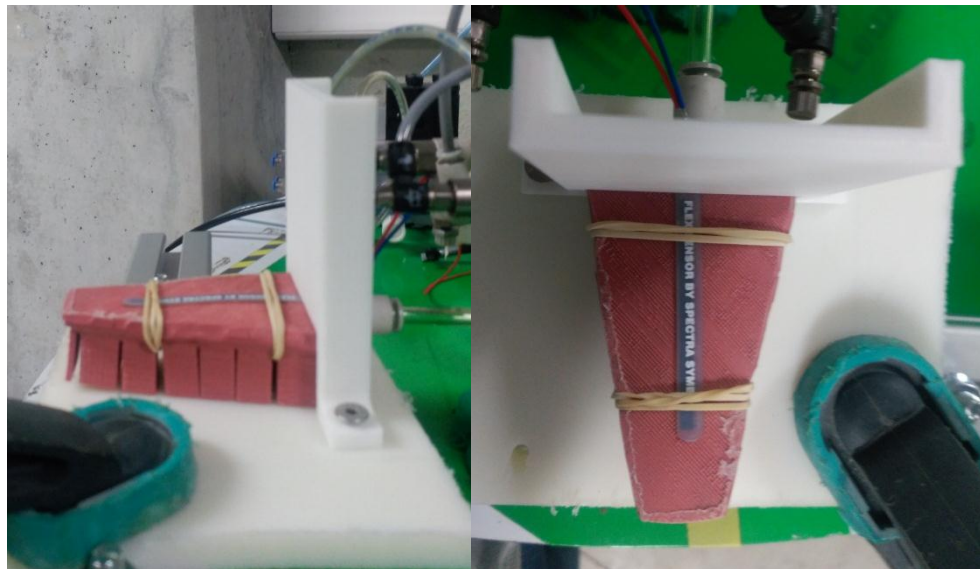


Figura 42. Planta y perfil del sistema de medición

Se estima que a partir de que un elemento tenga un diámetro igual o superior a la longitud del sensor, ya no existe diferencia entre reposo o actuando y, por tanto, todos los diámetros superiores son rechazados. Dado que el sensor mide alrededor de 68 mm, de 68 mm hasta el infinito, rechazamos las muestras de estudio. Sin embargo, se decide realizar las pruebas con diámetros hasta 57mm ya que diámetros mayores podrían causar conflictos en los datos. Para ello añadimos nuevas piezas de medición:

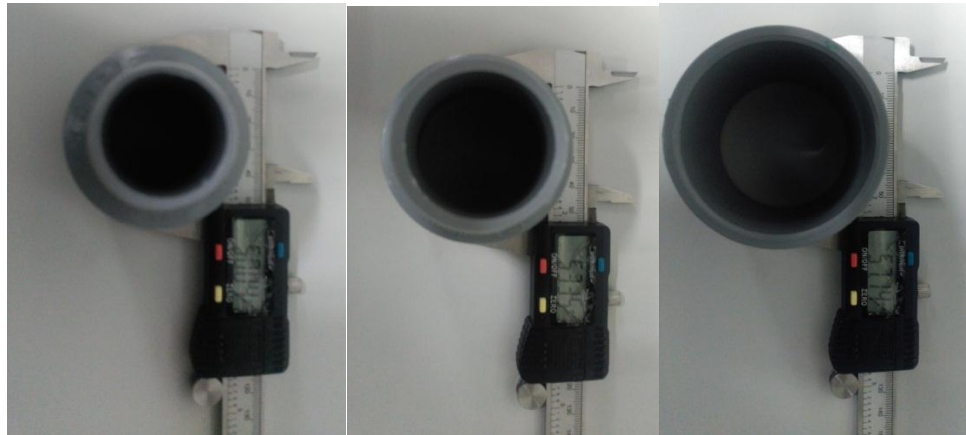


Figura 43. a) 50mm b) 53mm c) 57mm

### 5.1.2. Sensor de presión

Uno de los problemas que se plantean al ver los resultados de la repetitividad del sensor fabricado es si el sensor pierde tensión debido a que el dedo pierde presión. Esto podría provocar que el sensor fuera deformándose mientras actúa o está en reposo. Para conocer si la presión afecta al proceso, se decide colocar un sensor de presión y así poder visualizar la presión que se le aplica al dedo. También resulta bastante útil a la hora de calibrar el regulador de presión en el valor deseado.

El sensor seleccionado es de la empresa SMC, de la familia PSE54. Como se puede comprobar en la imagen siguiente, precisa de una fuente de alimentación para poder dar los 12 a 24 voltios que necesita para funcionar.

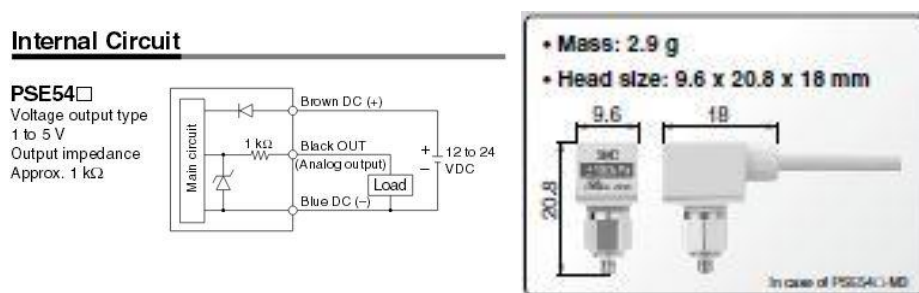


Figura 44. a) Circuito de conexión b) Dimensiones

Dependiendo de la funcionalidad de nuestro sistema, el sensor puede medir de una forma u otra. En nuestro caso, se usa para presión positiva, por tanto, puede soportar presiones entre 0 y 10 bares.

## Analog Output

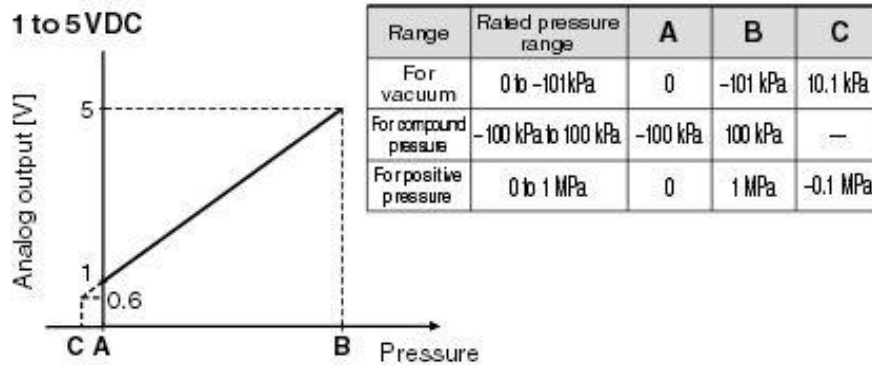


Figura 45. Rango de salida del sensor de presión

Dado que el rango es entre 0 a 10 bares y la tensión de salida es de entre 1 y 5 voltios, se puede realizar el modelado del sensor para obtener la presión dependiendo de la tensión de salida del sensor:

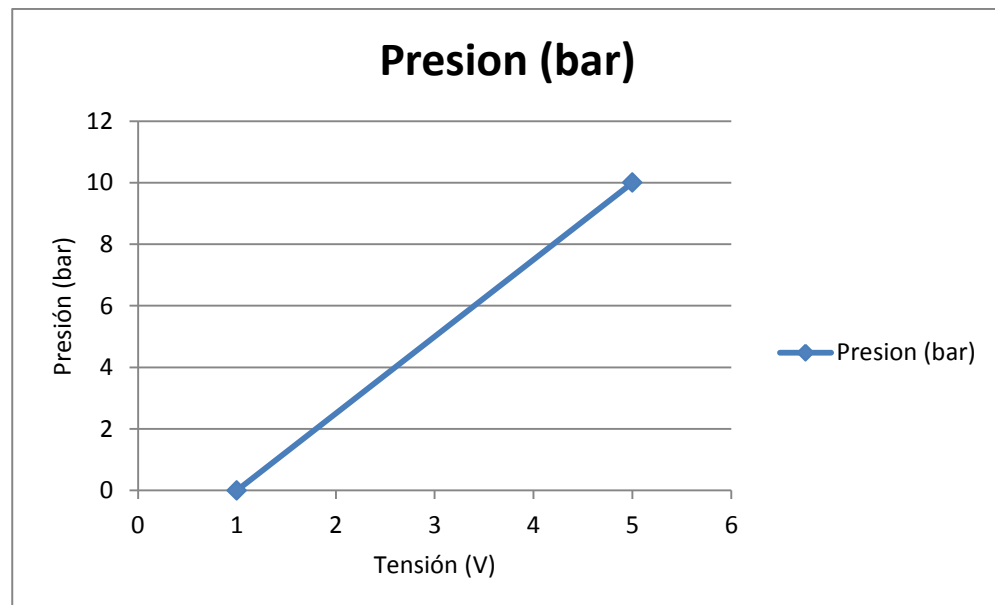


Figura 46. Modelado del sensor de presión

De esta gráfica se obtiene el siguiente modelo matemático perfecto debido a la linealidad que se tiene:

$$y = 2,5x - 2,5 \quad (7)$$

## 5.2. Datos obtenidos experimentalmente

La forma de operar es semejante a los experimentos realizados con el sensor fabricado. En primer lugar, como se ha visto en el apartado anterior, se va a estudiar la repetitividad del sensor, concretamente en reposo. En este caso, se lee el sensor en reposo durante 5 minutos (300 muestras) obteniendo los siguientes resultados:

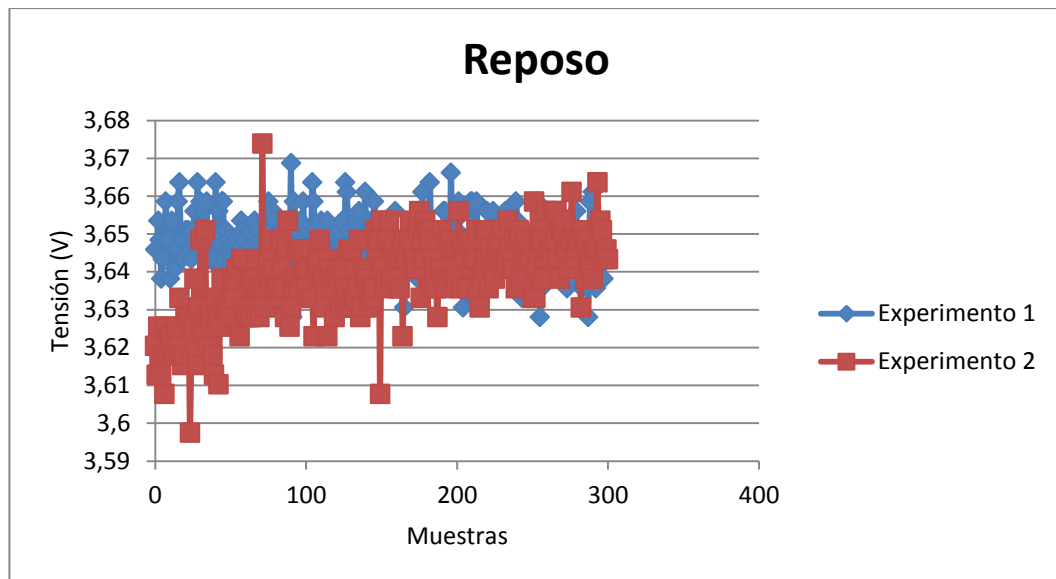


Figura 47. Repetitividad en reposo del sensor industrial

Como se puede observar, la repetitividad mejora considerablemente si se compara con los sensores fabricados. Además ambos experimentos tienden hacia el mismo valor. Por lo tanto, se estima que ya no hay pérdida de tensión a través del tiempo cuando está en reposo sino un ruido de alrededor 100mV.

A continuación, se va experimentar la repetitividad cuando está actuando. Así pues, se actúa sobre el elemento de 40 mm (celo) con una presión constante por parte del dedo robótico blando durante 10 minutos (600 muestras).

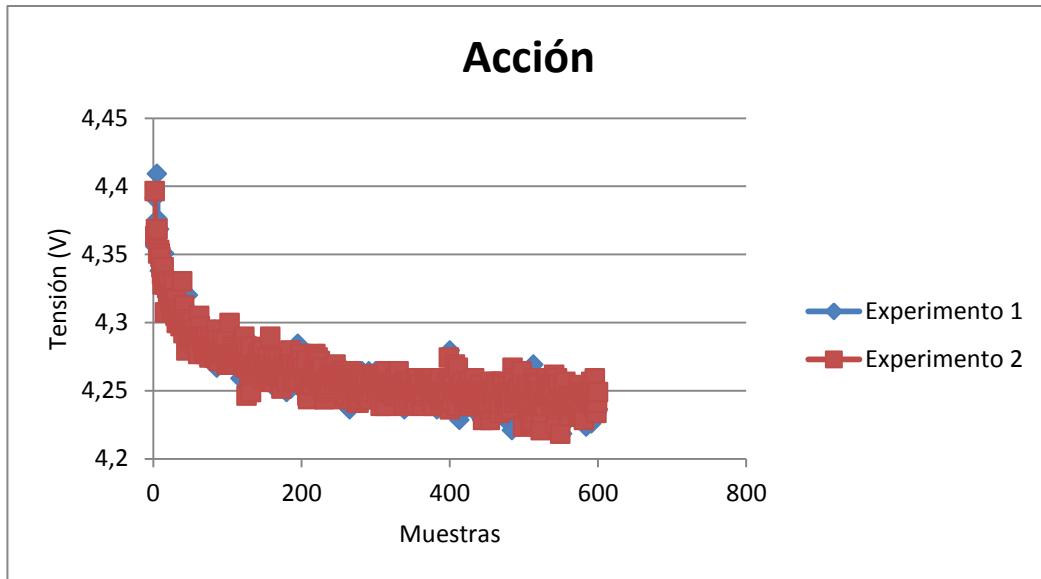


Figura 48. Repetitividad del sensor industrial actuando sobre 40mm

Como se puede comprobar, la repetitividad del sensor en dos experimentos semejantes, es prácticamente la misma. Sin embargo, vuelve a aparecer la pérdida de tensión a través del tiempo. Sin embargo, se ve reducido la diferencia de potencial a alrededor de 150 mV., lo cual es una mejora en comparación con el sensor anterior.

A la hora de realizar el modelado, la forma de operar en este caso es cogiendo 10 datos del sensor cuando está actuando sobre cada objeto y estudiando su estado tanto en acción como cuando vuelve al reposo:

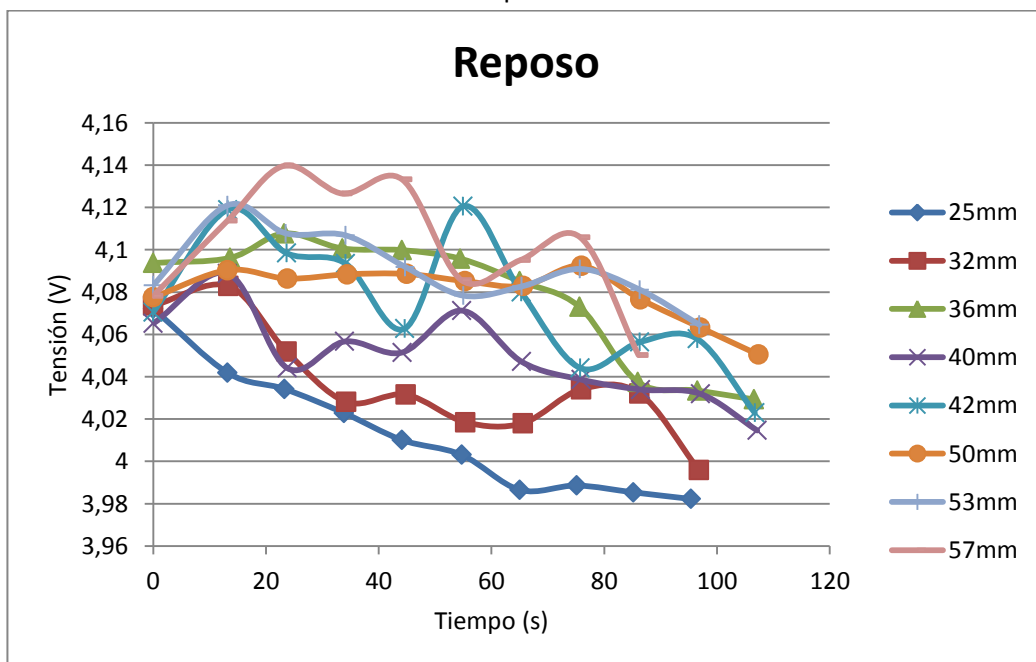


Figura 49. Datos en reposo del sensor industrial tras medir diferentes diámetros

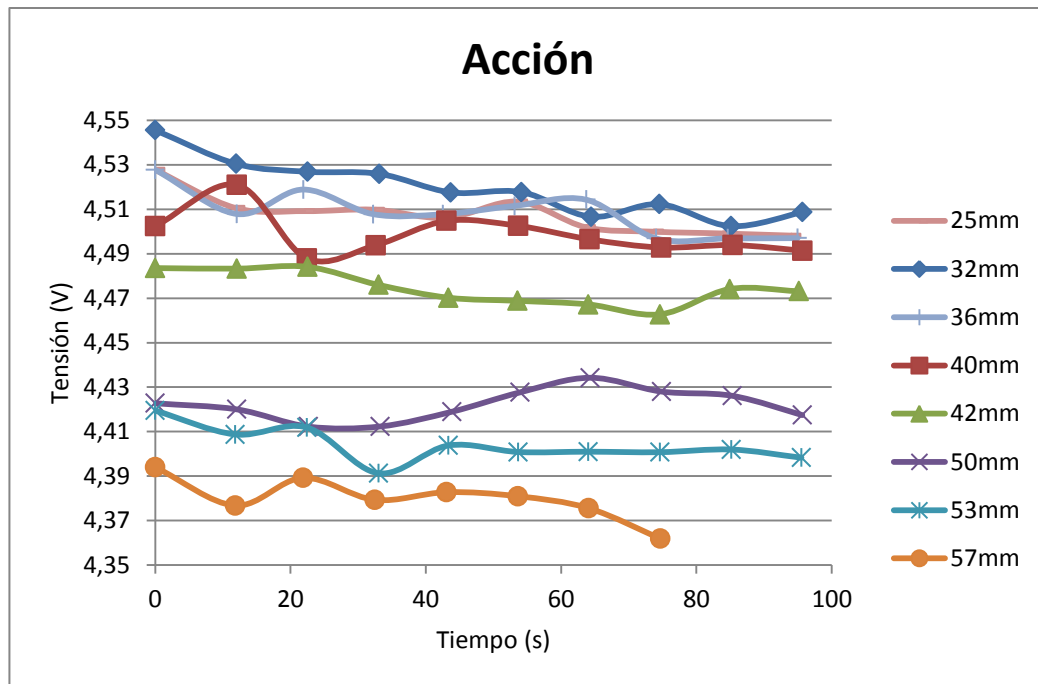


Figura 50. Datos medidos con el sensor industrial al actuar sobre diferentes diámetros

Como se puede comprobar, en el reposo se ha reducido considerablemente la histéresis. Mediante este procedimiento, la tensión en reposo tiene un margen de 0.15V. Por otro lado, si se presta atención a la gráfica cuando el sensor está actuando, el sensor tiene problemas para diferenciar los diámetros más pequeños pero da la sensación que se comporta mejor con los diámetros superiores a 40mm.

Otro de los aspectos que se querían estudiar es si en todos los casos se proporciona la presión de 1 bar deseada. Los resultados son los siguientes:



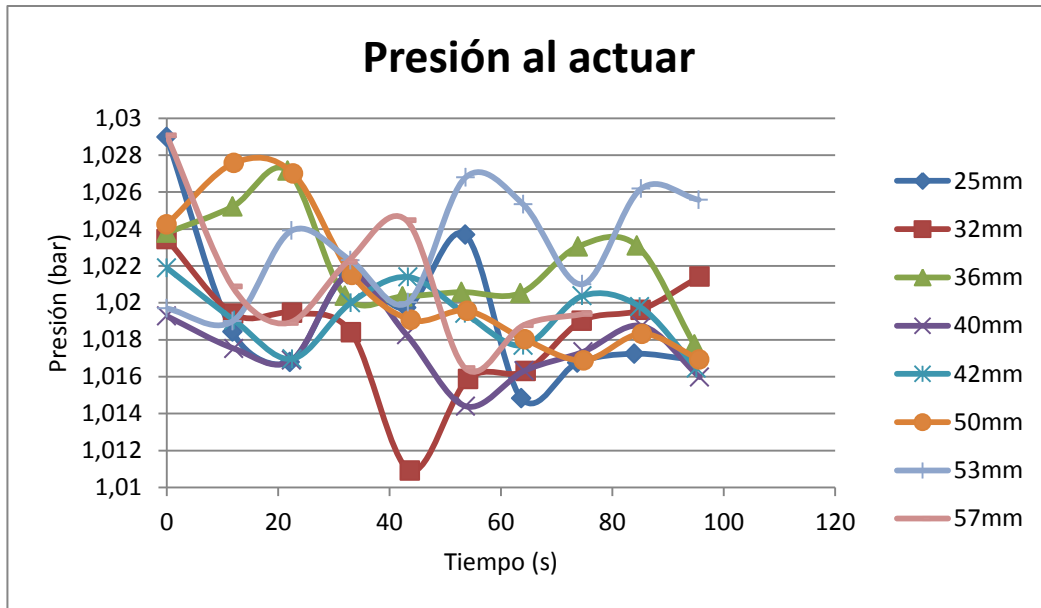


Figura 51. Presión leída por el sensor modelado

Como se puede comprobar, la presión únicamente sufre alteraciones de dos centésimas de bar, por tanto, se deduce que no hay pérdida de presión y que el dedo siempre se ejercita de igual manera.

A partir de los datos del sensor cuando está actuando, se realiza la media de dichos datos y se realiza el modelado:

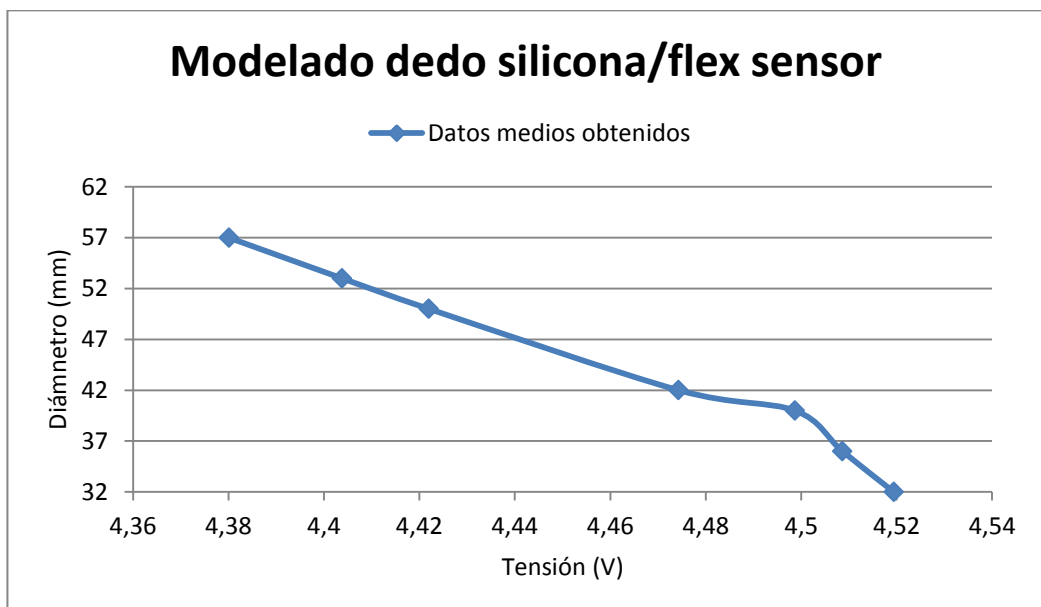


Figura 52. Modelado dedo silicona/flex sensor

Como se puede comprobar, el modelado no es completamente lineal, por tanto, se necesita hacer una aproximación lineal a la recta obtenida, obteniendo el siguiente modelo matemático:

$$y = -164,56x + 777,91 \quad (8)$$

$$R^2 = 0,9789$$

Por tanto, con ésta aproximación lineal se consigue a priori una fiabilidad de casi 98%.

A partir de este modelado, se realiza la comprobación del mismo para conocer si la aproximación realizada tiene la suficiente fiabilidad. Como se ha observado que funciona mejor con diámetros altos, se comprueba con un diámetro de 50mm:

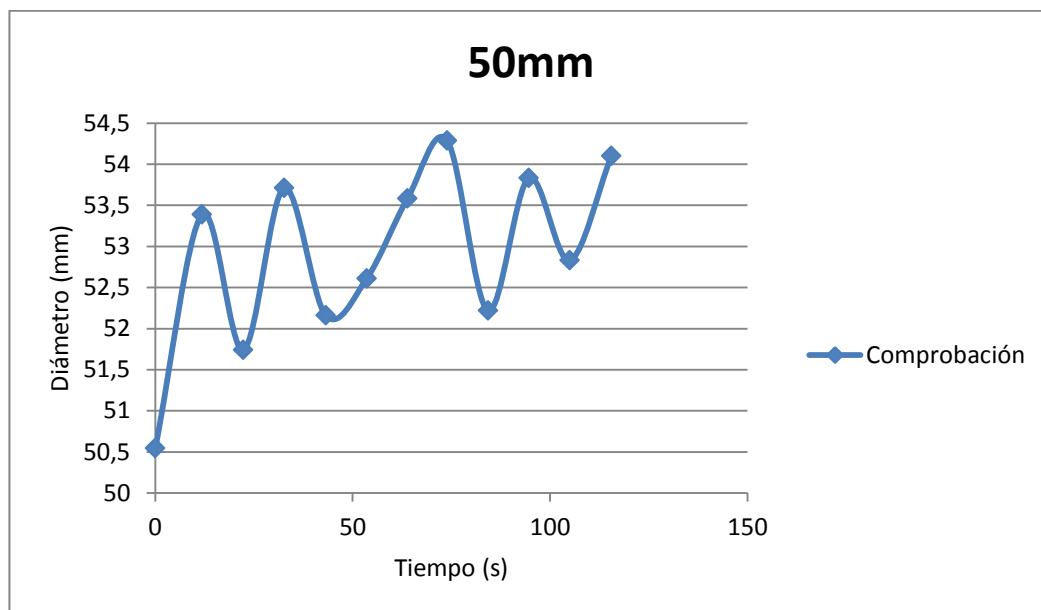


Figura 53. Comprobación del modelado según producto de 50 mm de diámetro

Como se puede observar, puede tener un error superior a los 4mm. lo cual impide que se llegue al objetivo de medir milimétricamente. Se podría incluso aceptar un error de 2mm. pero en este caso se sobrepasa con creces.

## 6. SISTEMA DE AGARRE DEDO DE POLIURETANO CON SENSOR INDUSTRIAL

Como se ha podido comprobar en el apartado anterior, existe una mejora sustancial con el uso del sensor industrial. A partir de este sensor se busca realizar un nuevo sistema que sea más estable y pueda realizar mejores agarres para un pick&place.

### 6.1. Sistema de medición

#### 6.1.1. Dedos de poliuretano

Vistos los resultados anteriores, se pretende buscar unos dedos robóticos blandos que acompañen mejor al sensor en su movimiento. Se seleccionan unos dedos blandos de poliuretano fabricados industrialmente por FESTO:

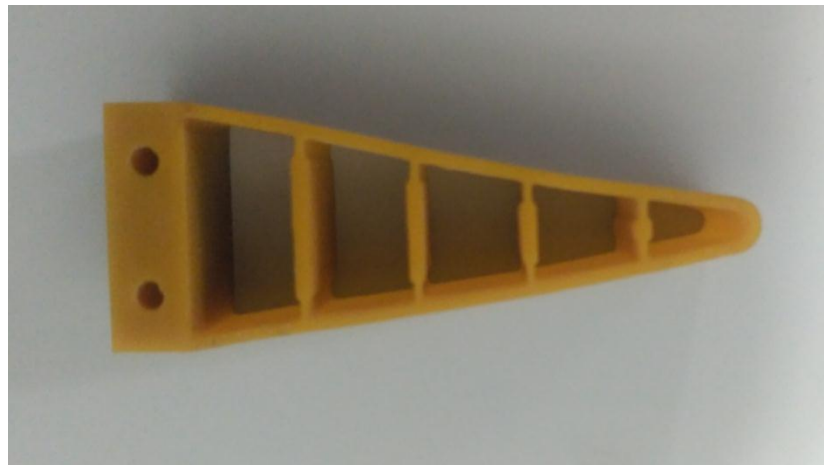


Figura 54. Dedo de poliuretano de FESTO

Estos dedos se denominan dedos adaptativos con efecto FinRay y por el tipo de material de que están hechos, pueden estar en contacto directo con productos alimenticios. Estos dedos se caracterizan principalmente por adaptarse a la forma del producto a tratar mediante procesos no destructivos para realizar la función de pick&place.

#### 6.1.2. Sistema de sujeción y accionamiento

Se estima que mediante presiones entre 2 y 3 bares de presión, el sistema puede hacer su tarea sin afectar de ninguna manera el producto. En este caso se pretende simular el efecto de pinzas que se cierran y abren. Para ello, se va a utilizar un cilindro compacto de doble efecto accionado por presión que se abre o

se cierra dependiendo de si coge o deja un producto. Este cilindro destaca por sus 4cm de carrera que permitirá que cuando esté abierto, no haya contacto con el producto a tratar. Además, es necesario colocar un adaptador entre el cilindro y los dedos robóticos blandos para que estos últimos puedan moverse para coger el producto.

Los dedos están colocados en reposo a una distancia de 73 mm entre sí. Una distancia mayor, supondría una reducción del intervalo posible a medir. Tampoco interesa una distancia mucho menor ya que podría evitar un correcto agarre del material o que llegue al tope el vástago del actuador.

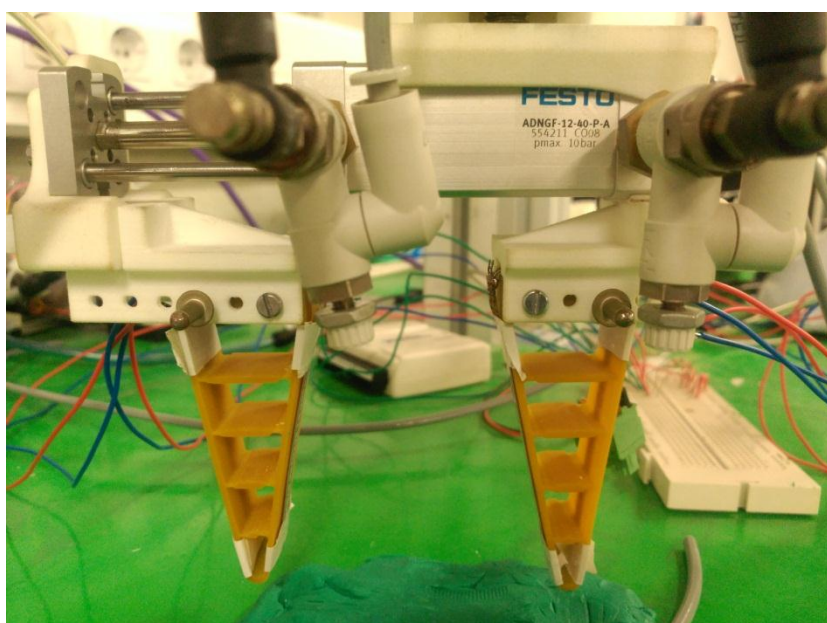


Figura 55. Sistema de agarre con dedos de poliuretano

### 6.1.3. FlexSensor

Para la realización del modelado de los dedos se sitúa un sensor en cada cara de los dedos, siempre teniendo presente la dirección donde la deformación producirá un ensanchamiento de las partículas conductoras.

El sensor que está en contacto con el producto, se denominara sensor de contacto, mientras que el sensor exterior es el sensor de medida.

Dado que el producto puede ser alimenticio, se ha de tener en cuenta que el sensor de contacto no podrá estar en contacto con el producto en la aplicación por salubridad e higiene. Por tanto, se necesita hacer un modelado del sensor de

medida teniendo en cuenta la medida del sensor de contacto y cómo afecta a su lectura la garra.

Dado que es necesario diferenciar entre los 4 sensores, se declaran los siguientes términos para cada uno de ellos:

- Sensor 1: Sensor de medida ubicado en la cara exterior del dedo fijo.
- Sensor 2: Sensor de contacto ubicado en la cara interior del dedo fijo.
- Sensor 3: Sensor de medida ubicado en la cara exterior del dedo móvil.
- Sensor 4: Sensor de contacto ubicado en la cara interior del dedo móvil.

Así mismo, el nuevo circuito eléctrico es como el que se muestra a continuación:

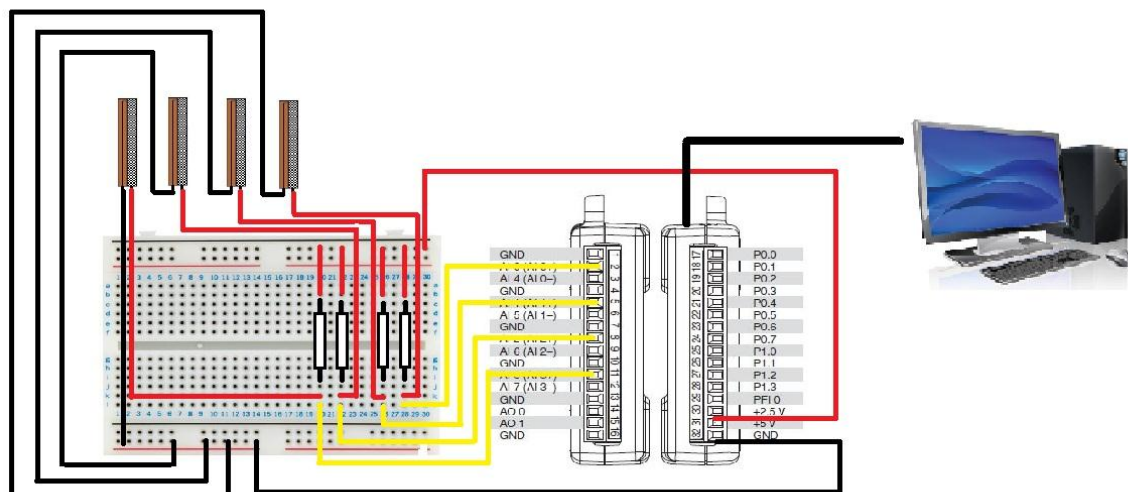


Figura 56. Circuito eléctrico 4 sensores

## 6.2. Datos obtenidos experimentalmente

Como se ha visto en los apartados anteriores, primero se va a estudiar la repetitividad del sistema durante 300 muestras tanto en reposo como en acción.

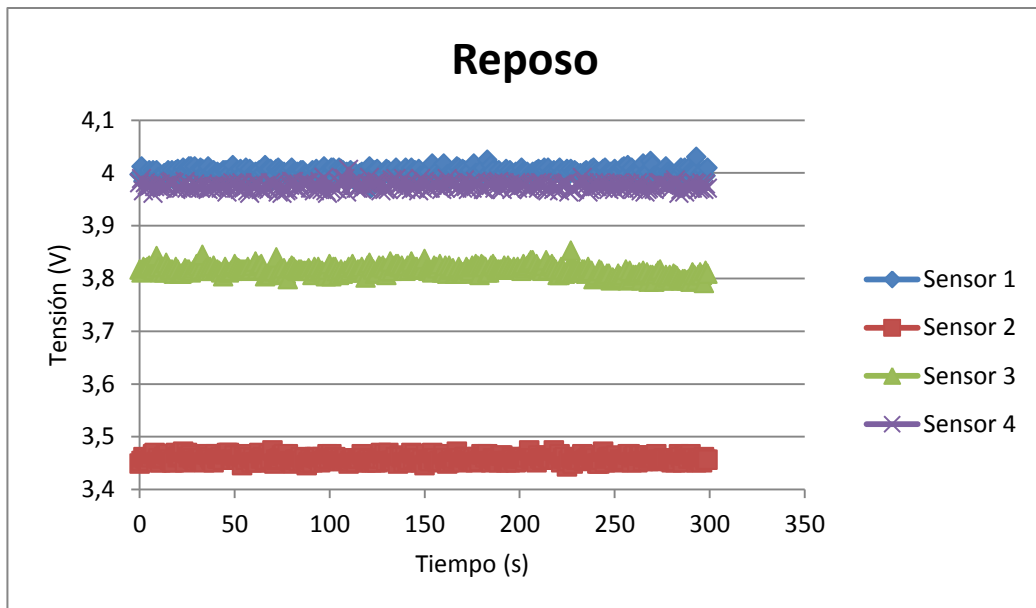


Figura 57. Repetitividad en reposo del sensor industrial en dedo de poliuretano

Como se observa en la repetitividad en reposo es bastante buena, aunque existe un poco de ruido de 50 mV de pico a pico. En cuanto al sistema en acción, los resultados son los siguientes:

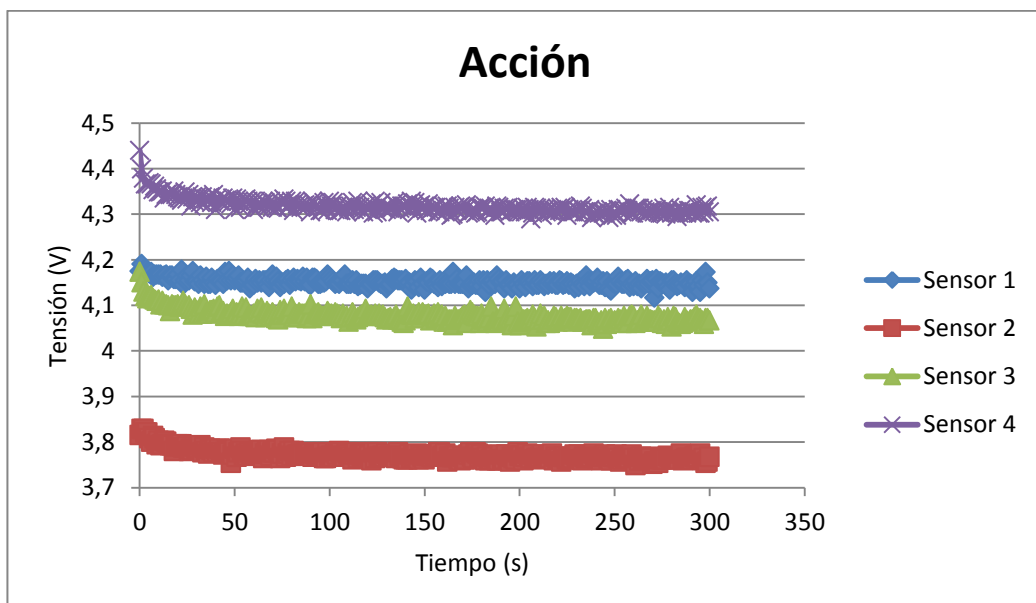


Figura 58. Repetitividad del sensor industrial actuando sobre 50mm

La repetitividad en el caso de los sensores actuando es también bastante buena pero presenta un problema. El problema existente es que tarda alrededor de 50 muestras en estabilizarse en un valor. Esto no es beneficioso ya que difieren los valores

iniciales con los finales y los proceso alimenticios no pueden esperar 50 segundos para esperar la estabilización del sensor para realizar el pick&place.

Independientemente de ello, se va a realizar el modelado de cada uno de los sensores para ver cómo responden dependientemente de la posición en la que se encuentren. En primer lugar, se estudia cómo afecta el reposo cuando se producen los accionamientos de abrir y cerrar en sucesión:

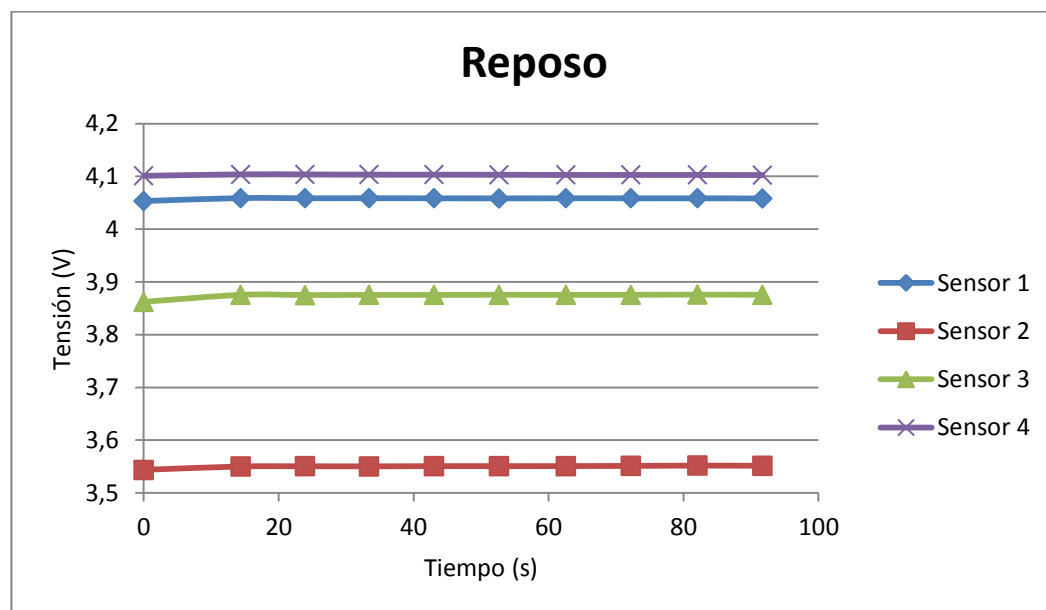


Figura 59. Datos en reposo del sensor industrial tras medir diferentes diámetros en los dedos de poliuretano

Como se puede comprobar, el sensor vuelve muy bien a su posición inicial tras hacer un cierre de los dedos. Con ello, se confirma lo visto en la repetitividad y es que en reposo, el sensor tiene mucha fiabilidad.

Por otro lado, se va a ver cómo responden los diferentes sensores cuando actúan contra un producto. Los resultados obtenidos de cada uno de los sensores son los siguientes:

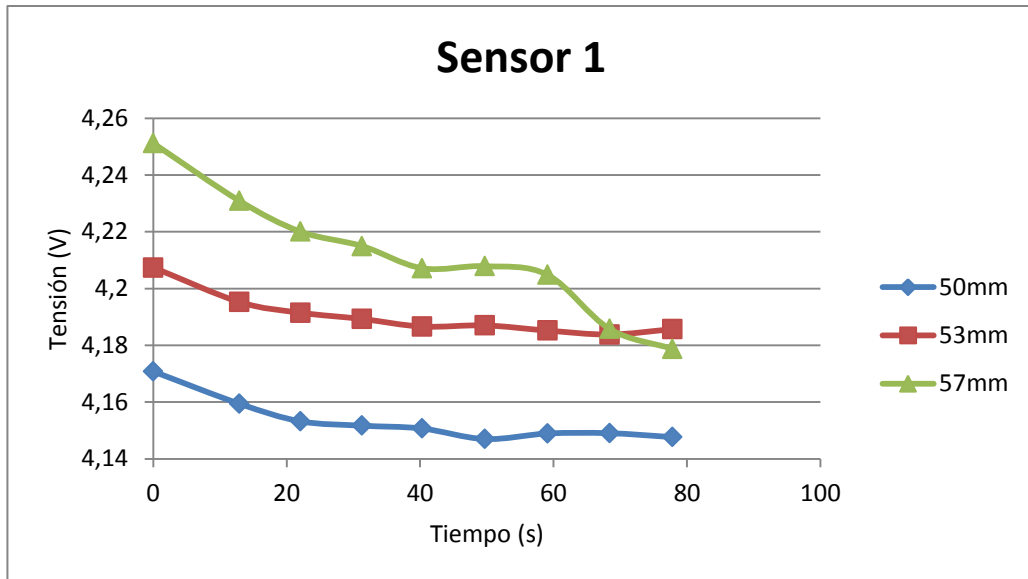


Figura 60. Datos medidos por el sensor 1 al actuar sobre diferentes diámetros

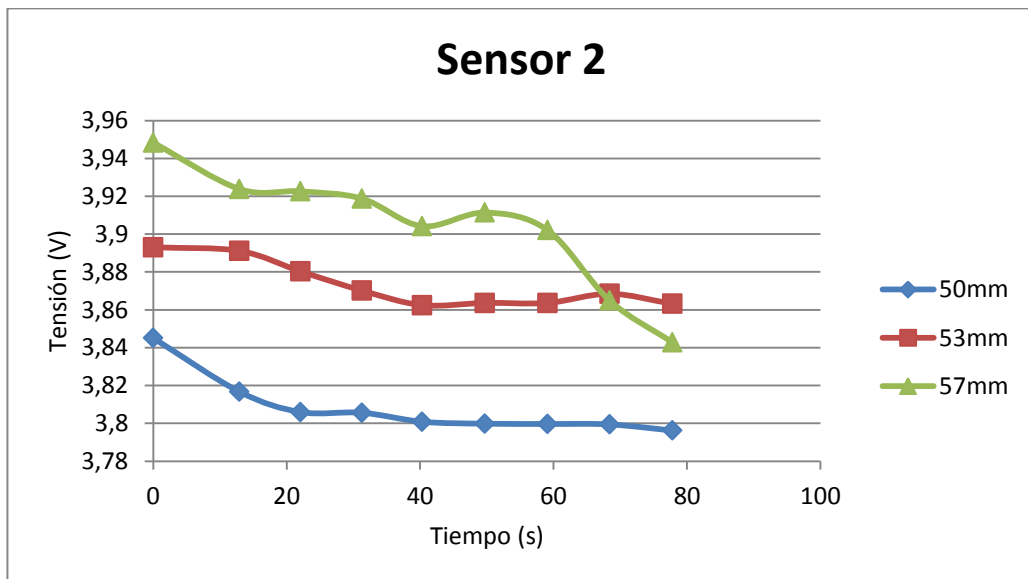


Figura 61. Datos medidos con el sensor 2 al actuar sobre diferentes diámetros



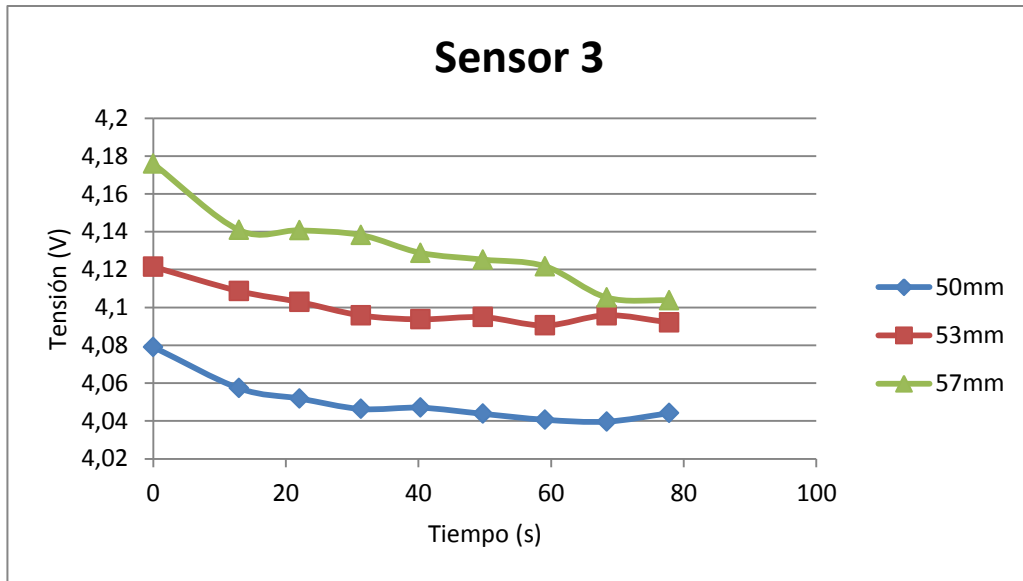


Figura 62. Datos medidos por el sensor 3 al actuar sobre diferentes diámetros

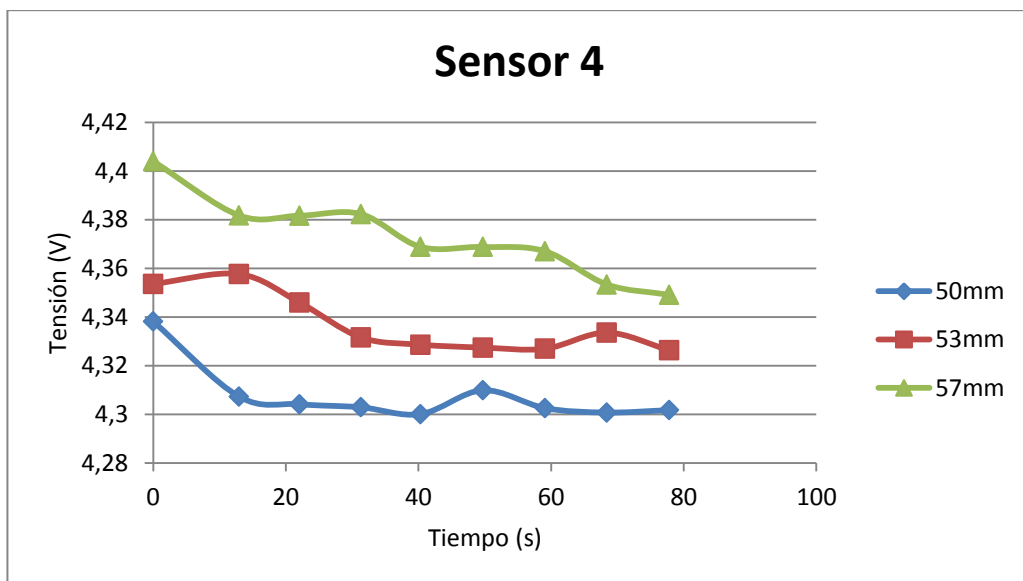


Figura 63. Datos medidos por el sensor 4 al actuar sobre diferentes diámetros

Como se pueden comprobar en cada una de estas gráficas, los sensores van perdiendo tensión tal como se mostraba en la repetitividad y en muchos casos pueden llegar a solaparse. Esto puede provocar que tenga dificultades a la hora de diferenciar diámetros de forma milimétrica.

Sin embargo, se va a realizar el modelado con el fin de conocer que sensores pueden funcionar con menor número de errores:

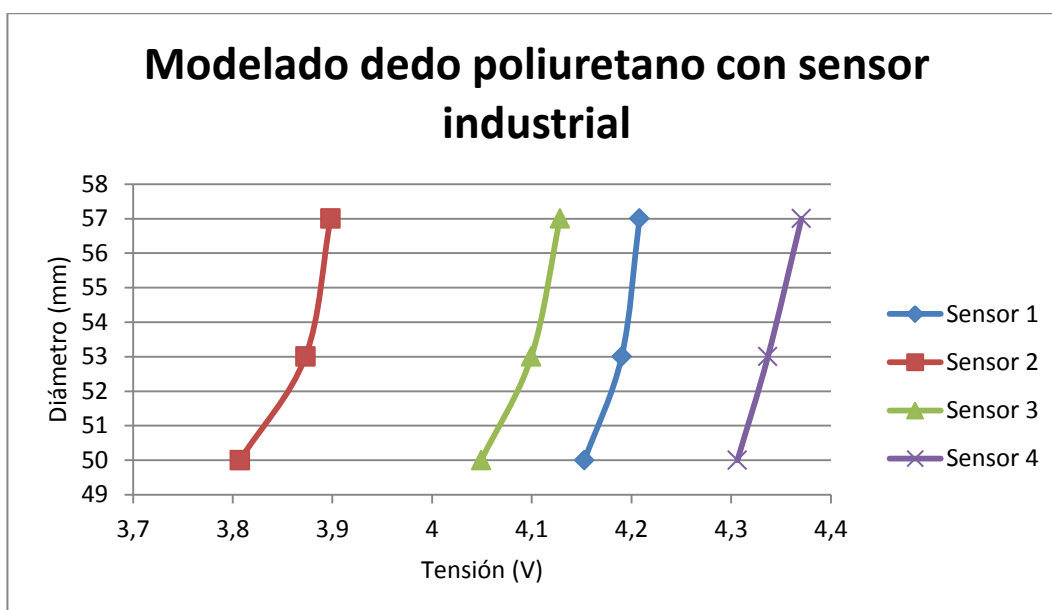


Figura 64. Modelado dedo poliuretano con sensor industrial

Como se puede comprobar, los modelados no son completamente lineales, por tanto, se necesita hacer una aproximación lineal a las rectas obtenidas, obteniendo el siguiente modelo matemático:

	Modelo matemático	R cuadrado
Sensor 1	$y = 119,8x - 447,89$	$R^2 = 0,9219$
Sensor 2	$y = 70,557x - 218,97$	$R^2 = 0,892$
Sensor 3	$y = 85,344x - 295,92$	$R^2 = 0,9442$
Sensor 4	$y = 109,09x - 419,88$	$R^2 = 0,9971$

Tabla 3. Modelado de los sensores flexibles según su posición

A partir de este modelado, se realiza la comprobación del mismo para conocer si la aproximación realizada tiene la suficiente fiabilidad. En este caso a diferencia de los casos anteriores, se hace la comprobación mediante objetos de diámetros aleatorios:

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor3	Sensor 4
Bien	42,1052632	31,5789474	26,3157895	31,5789474
Regular	42,1052632	36,8421053	68,4210526	31,5789474
Mal	15,7894737	31,5789474	5,26315789	36,8421053

Tabla 4. Comprobación de los modelados realizados

Se considera que funciona bien el sensor si tiene un error menor a 1mm. Funciona regular si su error está entre 1mm y 2 mm y funciona mal si el error es superior a 2mm. En la tabla anterior, se pueden ver los porcentajes en cada rango de



acierto. Como se puede comprobar, no existe una precisión milimétrica como se buscaba en las pruebas. Se busca una precisión tan pequeña porque en dicha posición se estima que el sensor sólo podría diferenciar diámetro entre 40 y 60mm, por lo que un error de 2 milímetros, ya supondría un error del 10%, lo que se asume como inadmisible.

Si se tuviera en cuenta un error de 2 milímetros como asumible, los sensores que mejor funcionarían serían el sensor 1 y el 3 con un 85% y 95% respectivamente. Esto es un resultado satisfactorio ya que son los dos sensores que no están en contacto directo con el producto. Se estima que los sensores 2 y 4, al estar en contacto, sufren una mayor deformación y con ello, aumenta su histéresis y puede ser la causa de su mayor error.

Otro problema que puede surgir a la hora de tratar estos sensores aparece cuando se repite varias veces un procedimiento con el mismo modelado. Unas centésimas de voltio de variación pueden cambiar todos los resultados obtenidos en el modelado calculado anteriormente. Esto denota la complejidad de conseguir un modelado fiable para calcular diámetros a nivel milimétrico.

## 7. SENSORES FLEXIBLES PARA GANTES BIÓNICOS

Dado que la aplicación que se buscaba realizar en los apartados anteriores no tiene los buenos resultados que se esperaba, se busca otra aplicación para darles un uso que sea útil. Por ello, se decide implementar estos sensores en el campo de las manos biónicas.

Esta nueva aplicación está diseñada para el control de manos biónicas. Se pretende usar una mano biónica de dimensiones pequeñas para niños que carezcan de mano. Mediante el movimiento de la muñeca del paciente, se va a codificar cuánto se deben cerrar los dedos de la mano para poder hacer un agarre correcto. Para ello, se pretende utilizar los sensores flexibles vistos anteriormente para leer en qué posición se encuentra la muñeca y así decidir en cuánto se deben cerrar los dedos.

Para optimizar en salidas digitales, se pretende utilizar únicamente dos, es decir, trabajar con dos bits. De esta manera será necesario realizar 4 posiciones:





Codificación	Posición	Descripción
00		Mano en reposo. La muñeca no se dobla ningún grado (0°)
01		Mano semiabierta. La muñeca se dobla 30°
10		Mano semicerrada. La muñeca se dobla 60°
11		Mano cerrada. La muñeca se dobla 90°. Máximo cierre.

Tabla 5. Tabla de codificación para la posición de la mano biónica

Para simular el proceso, se ha fabricado un guante que realizará la simulación del muñón del paciente. Dependiendo de cuánto se gire el guante, la mano se moverá a la posición adecuada. En la muñeca, se cosen los dos sensores que hemos visto previamente. Así pues el sistema queda como se observa a continuación:



Figura 65. Guante con sensores incorporados

El funcionamiento que sigue el programa de seguimiento de la muñeca es el siguiente:



Figura 66. Esquema de funcionamiento del guante

Mediante la adquisición inicial en reposo y en acción se obtiene el rango de valores que puede captar el sensor. Estos valores son los relativos a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  que se observan en la gráfica posterior. A partir de estos valores, se calculan los puntos intermedios de  $30^\circ$  y  $60^\circ$  respectivamente. Además a todos estos valores, se les añade una histéresis de entrada y de salida de su propio rango, consiguiendo que siga respondiendo bien incluso si los errores en el sensor aumentan. También cabe destacar de una zona muerta que va a evitar que haya una zona que esté oscilando entre dos valores. Esto es de gran ayuda ya que la mano tendrá menos cambios bruscos de posición y la utilidad será mucho mejor. La toma de decisiones se basa en el siguiente gráfico:

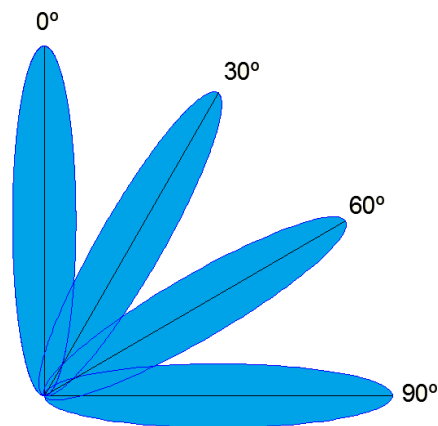


Figura 67. Esquema de toma de decisiones

Así mismo, todo el sistema es controlado mediante un interfaz que nos indica toda la información que se desea obtener del proceso. Como la resistividad en reposo puede variar en cualquiera de los dos sensores, hay que realizar unos calibrados iniciales para conocer el comportamiento de cada uno de los sensores. Para ello, se calibran ambos sensores tanto cuando están en reposo como cuando está en su posición máxima ( $90^\circ$ ).

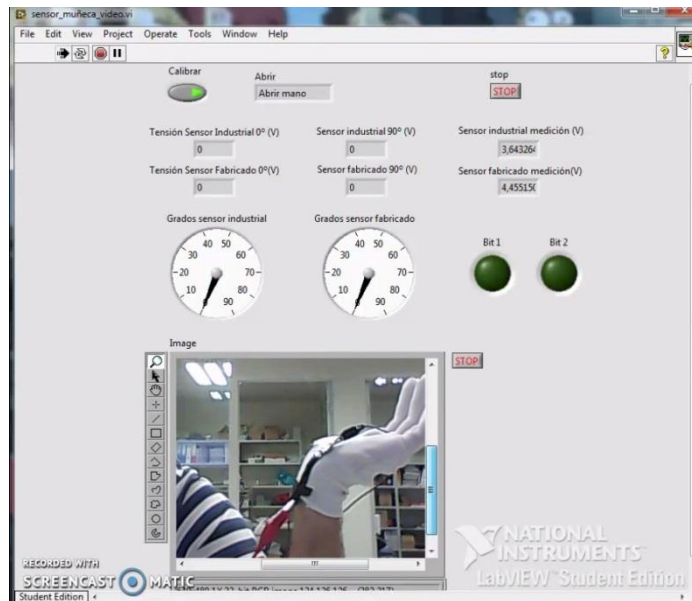


Figura 68. Adquisición inicial de datos en reposo

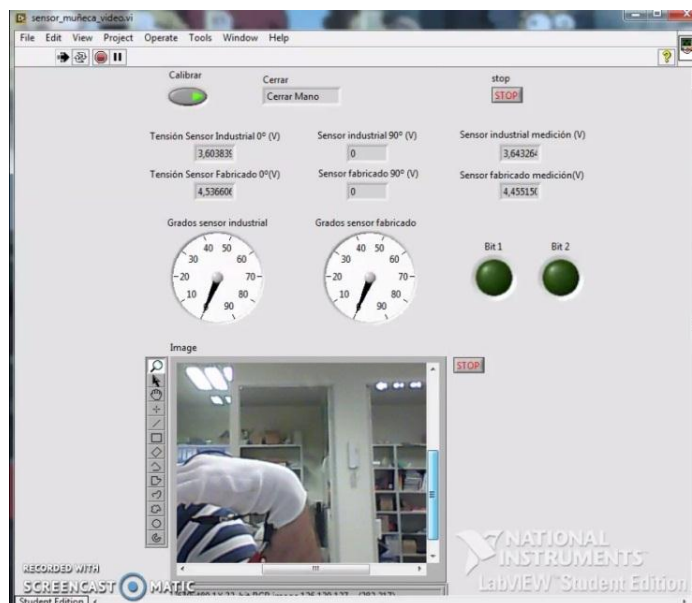


Figura 69. Adquisición inicial de datos en 90°

Por último, el sistema trabaja de forma cíclica. Hay marcadores en la interfaz que marcan valores que pueden ser de interés a la hora de encontrar errores. Los dos marcadores centrales muestran qué posición debería adaptar la mano biónica dependiendo de cada sensor. Dado que se sabe de los apartados anteriores que el sensor industrial funciona mejor, se sitúan dos leds que codificarán los resultados vistos en la Tabla 4. Estos leds, se traducen en dos salidas digitales de la tarjeta de adquisición de datos y éstas se diseñarán en un futuro para el control de un servo motor que realice el

movimiento de la mano biónica. El funcionamiento del programa para cada una de las fases es el siguiente:



Figura 70. Posición 0°



Figura 71. Posición 30°





Figura 72. Posición 60°

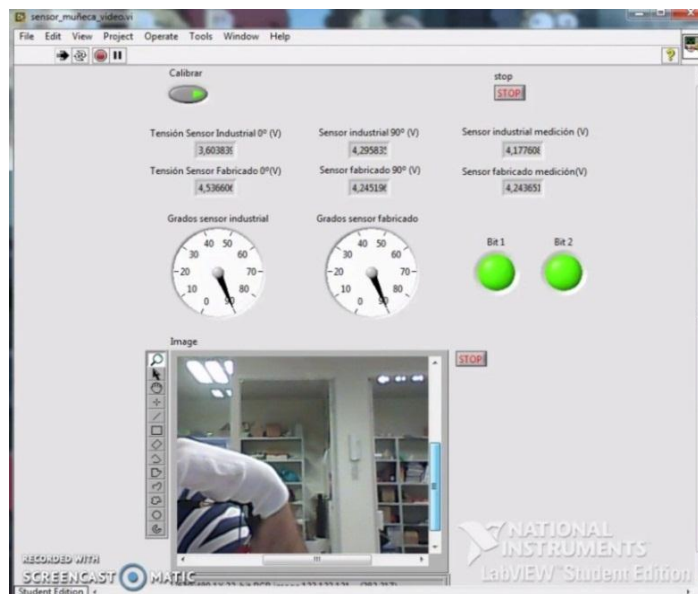


Figura 73. Posición 90°

Como conclusión de esta parte, el sensor fabricado no consigue diferenciar claramente entre posiciones, sólo diferencia entre la posición de reposo y la de 90°. Por tanto, no es un sensor fiable para esta aplicación.

Por otro lado, el sensor industrial marca siempre los resultados que se desean. Es capaz de diferenciar entre una posición y otra de la muñeca y así se puede realizar una buena codificación de los resultados. Por tanto, para ésta aplicación, el uso de sensores flexibles puede ser de gran utilidad.

## 8. RESUMEN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El sensor fabricado con materiales propios no ha resultado como se esperaba. La repetitividad que presenta tanto en reposo como actuando es mala ya que pierde tensión a través del tiempo. Por otro lado, es imposible hacer un modelado fiable ya que la variedad de oscilaciones entre los valores es demasiado grande. Cómo se comprueba en las pruebas con la mano biónica, parece que sí es capaz de diferenciar entre dos valores pero muy amplios entre ellos, en este caso, cuando el sensor pasa de 0° a 90° de flexión. Por tanto, está muy lejos del propósito de este trabajo fin de máster que es la medición de productos mediante su diámetro a nivel milimétrico. El sensor es muy sensible a contactos aunque no haya flexión del mismo, por tanto, se podría utilizar como sensor de contacto. Podría usarse en todo tipo de agarre robótico para conocer si la pinza hace contacto con el producto a tratar.

El sensor industrial elimina la repetitividad en reposo que aparecía en el sensor fabricado. Si se habla de la repetitividad cuando está actuando, le sucede lo mismo que al sensor anterior, bien es cierto que en este caso presenta una histéresis mucho más pequeña cuánto más robusto es el sistema del dedo de agarre. Sin embargo, la realización de un modelado fiable cobra mucha complejidad debido a varios aspectos. Existe poca repetitividad entre mismos sensores del mismo modelo. Las lecturas en reposo o actuando con la misma deformación son diferentes entre sensores del mismo modelo. También es muy susceptible a variaciones. Si el sensor es deformado muchas veces, la lectura cambia considerablemente con la primera lectura en reposo. La mejora de robustez mecánica o electrónica no produce una mejora sustancial en la respuesta de estos sensores. Por ello, sería posible realizar un modelado del sistema pero aceptando que se va a correr con un error de entre 10% y 20% como mínimo. Por tanto, tampoco sirve para el objetivo inicial de medir diámetros a nivel milimétrico. Sin embargo, como se ha comprobado en el apartado 7, si se aceptan los intervalos de error que pueden dar estas medidas del sensor, se puede llegar a aplicaciones muy útiles y con mucho futuro, sabiendo que estos sensores van a actuar con mucha fiabilidad.

Destacar que los sensores táctiles pueden tener un gran funcionamiento como sensores de contacto pero que si se pretenden utilizar para obtener información de manera muy precisa su uso no es recomendable.

Para finalizar, recalcar la evolución que pueden suponer los sensores táctiles en la manipulación de objetos. Podría permitir la selección de diferentes productos únicamente mediante la realización de un pick&place. Para que esto sucediera, la tecnología que envuelve estos sensores debería mejorar sustancialmente para conseguir sensores más fiables, con mejor resolución y sin histéresis.



Cómo se ha expuesto anteriormente, el mayor reto de este campo se verá dado en la capacidad de creación de nuevos sensores. Las tecnologías actuales no permiten el uso de estos sensores de manera completamente fiable y estable, sin embargo sí se pueden utilizar estos sensores en aplicaciones donde las especificaciones técnicas sean más flexibles y no necesiten una gran resolución. Se pueden utilizar perfectamente como sensores de contacto en aplicaciones donde sea necesario conocer si un objeto está siendo agarrado o no. También los mejores sensores podrían ser utilizados como sensores sensibles para identificar 5 posiciones de flexión bien diferenciadas unas a otras.

Si se piensan en trabajos futuros, se podría trabajar con otras tecnologías como las vistas en el la tabla 2 del presente trabajo fin de máster y poder realizar comparaciones entre ellas y las vistas en el presente documento con el fin de comprobar qué tecnologías serían las más propicias para encontrar los rangos de precisión más altos y poder centrarse en las mejores de ellas. Mediante este proceso se podrían encontrar mejores sensores que faciliten la obtención de datos relativos a productos de manera eficaz y minuciosa.

## 9. REFERENCIAS

- [1] Gabriel J. Garcia \*, Juan A. Corrales, Jorge Pomares and Fernando Torres, 2009, "Survey of Visual and Force/Tactile Control of Robots for Physical Interaction in Spain", Physics, Systems Engineering and Signal Theory Department, University of Alicante
- [2] Karsten Weiß and Heinz Wörn, July 2005, "The Working Principle of Resistive Tactile Sensor Cells", Institute for Process Control and Robotics (IPR) University of Karlsruhe
- [3] Mark H. Lee, July 2000, "Tactile Sensing: New Directions, New Challenges", Department of Computer Science, University of Wales
- [4] M.H. Lee, H.R. Nicholls, May 1998, "Tactile sensing for mechatronics-a state of the art survey" Department of Computer Science, University of Wales, Aberystwyth, UK and Industrial Research Limited, Christchurch, New Zealand
- [5] Sachin Chhita, Jürgen Sturm, Matthew Piccoli and Wolfram Burgard, June 2011, "Tactile Sensing for Mobile Manipulation"
- [6] J. Dargahi, S. Najarian, "Advances in tactile sensors design/manufacturing and its impact on robotics applications – a review" Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada
- [7] Vincent Wall, Raphael Deimel, Oliver Brock, "Selective Stiffening of Soft Actuators Based on Jamming"
- [8] Bianca S. Homberg, Robert K. Katzschmann, Mehmet R. Dogar, and Daniela Rus, October 2015, "Haptic Identification of Objects using a Modular Soft Robotic Gripper", Hamburg, Germany
- [9] Robert D. Howe, "Tactile Sensing and Control of Robotic Manipulation", Harvard University, Cambridge, USA
- [10] Artur Saudabayev, Huseyin Atakan Varol, September 2015, "Sensors for Robotic Hands: A Survey of State of the Art", Nazarbayev University, Kazakhstan
- [11] Nicholas Wettels, Jeremy A. Fishel and Gerald E. Loeb, Agosto 2010, "Multimodal Tactile Sensor"
- [12] Debeshi Dutta, Biswajeet Champaty, Indranil Banerjee, Kunal Pal and D.N. Tibarewala, 2015, "Development of a Wireless Attendant Calling System for Improved Patient Care", School of Bioscience and Engineering, Jadavpur University, Kolkata, India

- [13] P. Dario, D. de Rossi, C. Domenici, R. Francesconi, "Ferroelectric polymer tactile sensors with anthropomorphic features", Centro "E. Piaggio", University of Pisa
- [14] Kathika Roy, Durga Prasad Idiwai, Annapurna Agrawal, Bani Hazra, Julio 2015, "Flex sensor based wearable gloves for Robotic gripper control", India
- [15] Min Li, Tommaso Ranzani, Sina Sareh, Lakmal D Seneviratne, Prokar Dasgupta, Helge A Wurdemann and Kaspar Althoefer, May 2014, "Multi-fingered haptic palpation utilizing granular jamming stiffness feedback actuators"
- [16] Ian Lim, Joshua Lu, Claudine Ng, Thomas Ong and Clement Ong, March 2015, "Sign-language Recognition through Gesture & Movement Analysis (SIGMA)", College of Computer Studies – De La Salle University Manila, Philippines
- [17] Reglamento (CE) Nº852/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de Abril de 2004, relativo a la higiene de los productos alimenticios  
<http://www.navarra.es/NR/rdonlyres/AF89D5BA-59B7-4216-909D-5B57FC8BD54C/197388/GuiasInstalacionesReglamento8522004.pdf>
- [18] Directiva Europea sobre seguridad de la maquinaria
- [19] F. Erzincanli and J.M.Sharp, 1997, "Meeting the need for robotic handling of food products", Elsevier Science
- [20] Paul Gehrke, 2016, "Development and Design of a Soft Robot Gripper for Usage in the Food Industry", ai2, UPV
- [21] Festo MultiChoice Gripper:  
[https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/333986/Festo\\_MultiChoiceGripper\\_en.pdf](https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/333986/Festo_MultiChoiceGripper_en.pdf)
- [22] Actuadores dieléctricos elastómeros (DEA):  
<http://lmts.epfl.ch/cms/site/lmts/lang/en/electroadhesion>
- [23] DEMES: <http://lmts.epfl.ch/gripper>
- [24] PneuNets: <http://softroboticstoolkit.com/book/pneunets-bending-actuator>
- [25] Elastómeros: <http://jennyosorio15.blogspot.com.es/2012/10/introduccion-los-de-de-varios-aditivos.html>
- [26] BioTac: <http://www.syntouchllc.com/Products/BioTac/>



[27] Velostat: <http://www.kobakant.at/DIY/?p=381>

[28] Velostat <https://www.adafruit.com/product/1361>

[29] Placa virgen:

<http://webdiee.cem.itesm.mx/web/servicios/archivo/tutoriales/pcb/sld003.htm>

[30] Cinta americana: <http://www.precygrap.com/cinta-americana.html>

[31] Hilo Conductor <https://www.sparkfun.com/products/10867>

[32] Sensor de presión: <http://www.smc pneumatics.com/pdfs/PSE.pdf>

[33] Fabricación sensor:

<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/FLEX%20SENSOR%20DATA%20HEET%202014.pdf>

[34] Flex Sensor: <https://www.youtube.com/watch?v=FEPgLbPv6NM>