



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA**

**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NUEVO  
ROBOT BLANDO CON MORFOLOGÍA DE UN  
GUSANO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**JOAKIN CRISTÓBAL UGALDE CASTRO**

**PROFESOR GUÍA:  
JUAN CRISTÓBAL SEBASTIÁN ZAGAL MONTEALEGRE**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RODRIGO HERNÁNDEZ PELLICER  
ARIEL CALDERÓN AVENDAÑO**

**SANTIAGO DE CHILE  
2017**

## Resumen

Un robot blando es una nueva clase de máquina que se caracteriza por estar conformado principalmente por materiales altamente deformables y blandos, como elastómeros. Estos robots pueden lograr tareas complejas mediante sistemas simples y de bajo costo.

El presente trabajo de título consiste en el diseño y fabricación de un robot blando similar a un gusano y en la implementación de control de lazo cerrado sobre este, utilizando sensores blandos que otorgan sentido táctil. La motivación de este trabajo es producir resultados de interés científico, dado que no existen precedentes de esto en la literatura.

El robot desarrollado se inspira en el cuerpo de los gusanos terrestres y cuenta con dos tipos de músculos de acción neumática: uno de deformación preferente radial (ubicados como cabeza y cola) y otro axial (entre estos dos), los cuales imitan un metámero (segmento muscular) de un gusano y permiten desarrollar un movimiento peristáltico en cavidades mediante una ejecución coordinada. Los actuadores radiales se hinchan anclándose a las paredes y el actuador axial desplaza el cuerpo del robot. El robot está conformado principalmente por resina de silicona altamente deformable.

Se utiliza un diseño de sensor blando resistivo para medir deformación, compuesto de una matriz de silicona y canales internos rellenos de metal líquido. La deformación de los canales genera un cambio en la resistencia al variar la geometría del conductor. Estos sensores se ubican en el manto del actuador radial junto con una banda estriada, de esta forma, además de medir deformación, la localización de la presión en las estrías cierra rápidamente los canales al ocurrir contacto, alzando la señal del sensor.

Se fabrica una serie de sensores y actuadores blandos mediante moldes impresos en 3D. Estas componentes son ensambladas y caracterizadas en diversos ensayos, demostrando que efectivamente existe un cambio perceptible en la señal del sensor cuando el actuador radial se expande y hace contacto con las paredes internas de una cavidad, luego, el uso de la derivada de la señal permite la toma de decisiones.

Se propone, diseña e implementa un sistema de control para el robot, utilizando un Arduino UNO como controlador, el cual recibe la señal acondicionada de estos sensores a través de un circuito de amplificación, y manipula un arreglo de transistores para la activación de compresores y válvulas del circuito neumático. El algoritmo de movimiento se programa mediante la definición de estados y condiciones de transición basadas en el uso de la derivada promedio y el tiempo transcurrido.

Finalmente, el sistema completo se ensambla y se realizan pruebas de concepto, demostrando que el robot puede trepar verticalmente en un tubo circular de diámetro variable bajo un mismo controlador, e incluso en cavidades abiertas (como planos divergentes) e irregulares.

# Agradecimientos

A los profesores miembros de la comisión: A Juan Cristóbal Zagal, por brindarme un espacio en el laboratorio y tantas oportunidades para poder hacer lo que me gusta con libertad, a Rodrigo Hernández, por enseñarme y haber motivado mi interés en el trabajo científico, y a Ariel Calderón, por ser mi sensei en el laboratorio.

A mis padres, pues sin su gigantesco esfuerzo y sacrificio durante tanto tiempo no podría haber llegado hasta este punto. El hogar y la educación que me otorgaron me permitieron crecer en la persona que soy.

A mi perrita Gupi, por levantarme el ánimo todos los días al llegar a casa después de las jornadas agotadoras, con su colita inquieta, nariz mojada y suave lomo.

A mis amigos, por las risas y cada momento, a los que conocí en la Universidad y a los que me atormentan desde el Liceo. Por esas veces que “¿Para qué vamos a ir a clases?, ¡Eso se pasa solo!, ¿Vamos por su chelita?”, y el posterior sufrimiento compartido. Por las tardes de guitarra en el pasto y otras sacadas de vuelta. Sin duda, los mejores recuerdos son con ellos. A Tamara, por preocuparse tanto por mí y escucharme cuando lo necesito, a Pablo, por ser tan buen amigo y persona.

A mis compañeros de laboratorio, en el cual muchas veces pasé más tiempo que en mi propia casa. Por los largos días de trabajo apagando incendios (a veces literalmente), donde nada funcionaba y después sí, y de nuevo no. Gracias a ellos por el apoyo técnico y hacer la jornada más fácil y entretenida. Particularmente a Máx Vélez por el tiempo que llevamos de apostolado, y a Efrén Toala por asistirme con la fabricación (yo asistirlo a él, más bien).

A quienes me ayudaron en el laboratorio directamente durante el desarrollo previo de este trabajo: Lukas Sáez, Matías Benavides, Francisco Cubillos, Constantino Hernández, y especialmente al esclavo importado, Kévin Tirel.

A Paula Castillo, por amarme mucho y estar conmigo en todas las situaciones difíciles que he tenido que afrontar. Por hacer cada momento más cálido y darme razones para levantarme cada día. No sólo por su apoyo emocional, sino que también por fabricar parte de este trabajo.

Y al resto de las personas que no caben en una sola página.

# Tabla de contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto . . . . .	1
1.2. Objetivos y alcances . . . . .	2
<b>2. Metodología</b>	<b>3</b>
2.1. Organización del trabajo . . . . .	3
2.2. Desarrollo del robot . . . . .	3
2.3. Desarrollo del sistema de control . . . . .	4
2.4. Validación de la idea . . . . .	5
<b>3. Antecedentes</b>	<b>7</b>
3.1. Robótica blanda . . . . .	7
3.1.1. Contexto general . . . . .	7
3.1.2. Actuadores usualmente empleados en robótica blanda . . . . .	9
3.2. Morfología de un gusano . . . . .	11
3.3. Sensores blandos . . . . .	12
3.4. Control de sistemas . . . . .	13
3.4.1. Sobre teoría de control . . . . .	13
3.4.2. Tipos de control de lazo cerrado . . . . .	15
<b>4. Diseño, fabricación y caracterización de actuadores y sensores</b>	<b>19</b>
4.1. Diseño . . . . .	19
4.1.1. Diseño de actuadores . . . . .	19
4.1.2. Diseño de sensores . . . . .	21
4.2. Fabricación de componentes . . . . .	22
4.3. Ensayos de caracterización . . . . .	25
4.3.1. Mediciones directas . . . . .	25
4.3.2. Curva resistencia-deformación de sensores . . . . .	25
4.3.3. Respuesta al impulso de sensores . . . . .	27
4.3.4. Curva temperatura-resistencia de sensores . . . . .	28
4.3.5. Curva presión-deformación de actuadores . . . . .	29
4.3.6. Ensayos de contacto en tubos . . . . .	30
<b>5. Sistema de control</b>	<b>33</b>
5.1. Estrategia de control . . . . .	33
5.2. Sistema neumático . . . . .	35
5.3. Circuito eléctrico . . . . .	36

5.3.1.	Propósito . . . . .	36
5.3.2.	Diseño de circuito . . . . .	36
5.3.3.	Diseño de PCB . . . . .	40
5.4.	Programa . . . . .	40
5.4.1.	Modelo . . . . .	40
5.4.2.	Pseudocódigo . . . . .	41
5.4.3.	Estructura . . . . .	45
<b>6.</b>	<b>Resultados y discusión de fabricación, implementación y ensayos</b>	<b>47</b>
6.1.	Fabricación . . . . .	47
6.2.	Caracterización . . . . .	51
6.3.	Pruebas de funcionamiento . . . . .	62
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>67</b>
7.1.	Cumplimiento de objetivos . . . . .	67
7.2.	Conclusiones generales . . . . .	68
7.3.	Limitaciones . . . . .	68
7.4.	Trabajo futuro . . . . .	69
	<b>Bibliografía</b>	<b>70</b>
	<b>Anexos</b>	<b>73</b>
Anexo A.	Recursos utilizados . . . . .	74
A.1.	Componentes mecánicos . . . . .	74
A.2.	Componentes electrónicos . . . . .	74
A.3.	Máquinas . . . . .	75
A.4.	Materiales . . . . .	75
Anexo B.	Planos, esquemáticos y otros . . . . .	76
B.1.	Molde de inyección . . . . .	76
B.2.	Neumática . . . . .	77
B.2.1.	Circuito neumático para ensayo de presión-deformación en actuadores . . . . .	77
B.2.2.	Circuito neumático para ensayo en tubos . . . . .	77
B.2.3.	Circuito neumático propuesto . . . . .	78
B.3.	Electrónica . . . . .	78
B.3.1.	Circuitos para ensayos de caracterización . . . . .	78
B.3.2.	Diagrama de PCB . . . . .	80
B.3.3.	Esquema de circuito de control . . . . .	81
B.4.	Planos de moldes . . . . .	82
B.4.1.	Actuador axial . . . . .	82
B.4.2.	Actuador radial . . . . .	83
B.4.3.	Sensor . . . . .	84
Anexo C.	Programa . . . . .	85
C.1.	Funciones generadas . . . . .	85
C.1.1.	Funciones generadas . . . . .	85
C.2.	Programa de control . . . . .	86

# Índice de figuras

2.1. Esquema de metodología para ejecutar etapa de desarrollo del robot . . . . .	4
2.2. Esquema de metodología para ejecutar etapa de desarrollo del sistema de control . . . . .	5
2.3. Esquema de metodología para ejecutar etapa de validación de la idea . . . . .	6
3.1. Robot bio-inspirado y robot bio-mimético . . . . .	8
3.2. Robot blando <i>Crawler</i> . . . . .	8
3.3. Ejemplos de manos desarrolladas en robótica blanda . . . . .	9
3.4. <i>Octobot</i> , el primer robot blando completamente autónomo . . . . .	9
3.5. Estructura y funcionamiento de soft-robot <i>Crawler</i> . . . . .	10
3.6. Aleación con memoria y robot Meshworm . . . . .	10
3.7. Esquema de funcionamiento de elastómeros dieléctricos y robot que los emplea . . . . .	11
3.8. Esquema de locomoción de un gusano . . . . .	11
3.9. Sensor blando de presión y deformación . . . . .	12
3.10. Resultados experimentales para sensor blando . . . . .	14
3.11. Diagrama de bloques de control en lazo abierto y cerrado. . . . .	15
3.12. Representación gráfica del estado de un sistema On/Off respecto a la variable de error sin y con histéresis . . . . .	16
3.13. Ejemplo de curva de un sistema de control On/Off respecto a la variable temperatura . . . . .	17
3.14. Curva típica de un controlador proporcional ante distintos niveles de ganancia . . . . .	18
4.1. Concepto de robot blando . . . . .	19
4.2. Fases en un ciclo de movimiento . . . . .	20
4.3. Esquema de robot con sensores blandos acoplados . . . . .	21
4.4. Modelo 3D de moldes para componentes . . . . .	23
4.5. Esquema de proceso de fabricación de componentes y ensamble del robot . . . . .	24
4.6. Esquema de montaje para extensión de sensor blando . . . . .	26
4.7. Esquema de montaje para ensayo de respuesta al impulso de sensor blando . . . . .	28
4.8. Esquema de montaje para ensayo de curva presión deformación en actuadores . . . . .	30
4.9. Esquema de montaje para ensayo de contacto en tubos . . . . .	31
5.1. Diagrama de bloques para controlar un actuador blando . . . . .	33
5.2. Diagrama del sistema de control para robot blando . . . . .	35
5.3. Sistema neumático . . . . .	36
5.4. Diagrama de un puente de Wheatstone . . . . .	37
5.5. Circuito de amplificación . . . . .	38
5.6. Circuito de potencia para componentes neumáticas . . . . .	39
5.7. Diagrama de circuito regulador de voltaje . . . . .	39

5.8. Diagrama de estados y transiciones . . . . .	41
5.9. Ejemplo de cálculo de derivada . . . . .	44
6.1. Moldes fabricados . . . . .	47
6.2. Actuadores fabricados y robot ensamblado . . . . .	48
6.3. PCB fabricada . . . . .	50
6.4. Panel de compresores y válvulas . . . . .	50
6.5. Sistema completo implementado . . . . .	51
6.6. Resultados de ensayo de estiramiento a lo largo sobre sensor blando . . . . .	53
6.7. Resultados de ensayo de estiramiento a lo ancho sobre sensor blando . . . . .	54
6.8. Cambio de resistencia en función del largo . . . . .	54
6.9. Resultados de ensayo de respuesta al escalón de sensor blando . . . . .	55
6.10. Acercamiento de resultados de ensayo de respuesta al escalón de sensor blando	56
6.11. Señal del sensor blando montado en actuador radial inflándose dentro un tubo	57
6.12. Señal del sensor blando y de presión en actuador radial inflándose . . . . .	58
6.13. Resultados de ensayo presión deformación en actuador radial . . . . .	59
6.14. Deformación en diámetro y altura de actuador radial . . . . .	60
6.15. Resultados de ensayo presión deformación en actuador axial . . . . .	61
6.16. Deformación en diámetro y altura de actuador axial . . . . .	61
6.17. Actuadores en máxima extensión . . . . .	62
6.18. Pruebas de contacto en tubos de diámetros 32, 40 y 48 mm . . . . .	62
6.19. Robot desplazándose en tubo cilíndrico de acrílico de diámetro variable . . . . .	64
6.20. Robot desplazándose entre 3 tubos cilíndrico de acrílico. . . . .	65
6.21. Robot desplazándose entre dos planchas de madera divergentes . . . . .	65

# Índice de tablas

4.1. Dimensiones principales de actuadores de robot gusano . . . . .	20
4.2. Dimensiones de canales en sensor blando diseñado . . . . .	22
4.3. Características de cables eléctricos seleccionados . . . . .	22
5.1. Estado de componentes en cada fase del algoritmo de movimiento . . . . .	33
5.2. Cálculos para puente de Wheatstone . . . . .	38
5.3. Condiciones de transición entre fases . . . . .	41
6.1. Dimensiones principales de sensores blandos . . . . .	52
6.2. Dimensiones principales medidas de actuadores de robot gusano . . . . .	52
6.3. Resistencia eléctrica de sensor blando . . . . .	52
6.4. Variación de resistencia eléctrica de sensor blando respecto a temperatura . . .	52
6.5. Última iteración de parámetros del controlador para movimiento del robot . . .	63



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto

Un robot blando es una nueva clase de autómatas que surge recientemente gracias a los últimos avances en materiales y procesos de manufactura (como impresión 3D). Los actuadores de estos robots se caracterizan por ser parte integral de la estructura y estar contruidos de materiales blandos y deformables.

Los músculos en seres vivos son similares, por lo que es frecuente que se generen robots bio-miméticos que emulan la forma en que se mueven los animales, como peces, gusanos, medusas y pulpos. El cuerpo blando de estos robots es más resiliente y adaptable que el de robots tradicionales, permitiendo una mejor interacción con el ambiente y con personas.

El uso de materiales deformables también se ha dado últimamente en el área de electrónica e instrumentación, para dar más comodidad a los usuarios de tecnologías vestibles, como ropa con sensores o prótesis. Se han desarrollado, por ejemplo, sensores blandos que buscan imitar la función de la piel, ideal para aplicar sobre robots y prótesis para otorgar sentido táctil.

Siendo esta área de la robótica relativamente nueva y sencilla de trabajar es que existe gran potencial para investigar e innovar, motivación principal de este proyecto.

El trabajo que se expone en este informe corresponde al diseño, fabricación, implementación y caracterización de un robot blando similar a un gusano, el cual se desplaza en cavidades mediante actuadores que se expanden y contraen por acción neumática, logrando un movimiento peristáltico como el de muchos de estos animales.

## 1.2. Objetivos y alcances

### Objetivo General

- El objetivo general de este trabajo es implementar un robot blando semejante a un gusano con retroalimentación de sensores blandos que se desplace en diferentes cavidades bajo un mismo controlador.

### Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

- Diseñar y fabricar un robot blando.
- Diseñar, fabricar y caracterizar sensores y actuadores del robot.
- Diseñar una estrategia de control de lazo cerrado sobre el robot que permita su desplazamiento.
- Construir un sistema neumático y fabricar una PCB para el circuito eléctrico.
- Probar el robot frente a distintos sistemas de tuberías, con diferentes formas, trayectos y tamaños.

### Alcances

Demostrar que los sensores blandos permiten automatizar el funcionamiento del robot, particularmente detectar el contacto con las paredes de una cavidad y así controlar el desplazamiento.

Parte de los sistemas necesarios para el funcionamiento del robot no se dispondrán dentro de la estructura del mismo (electrónica, neumática y control) por limitaciones de costo/tamaño de las componentes y dado que no es de importancia para el cumplimiento del objetivo general de este trabajo.

## Capítulo 2

# Metodología

### 2.1. Organización del trabajo

El trabajo se divide en 3 etapas, la primera corresponde al diseño y fabricación del robot en función de los antecedentes revisados (desarrollo del robot), la segunda al desarrollo del sistema de control necesario para su operación, y la tercera a la ejecución de experimentos para validar el concepto del robot ideado.

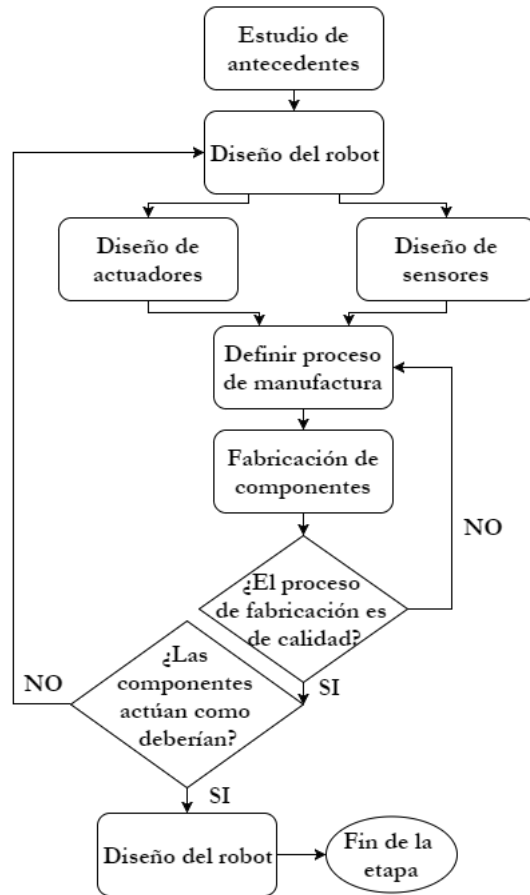
### 2.2. Desarrollo del robot

En la Figura 2.1 se observa el flujo de trabajo para la primera etapa.

Considerando el objetivo general del trabajo y la motivación (presentar resultados de interés académico), la primera etapa del trabajo es revisar antecedentes y el estado del arte respecto a robótica blanda, sensores blandos, acerca de la anatomía de gusanos y formas de control en lazo cerrado.

Posteriormente, y de acuerdo a los antecedentes, se propone un concepto de robot blando que emule la forma en que se desplaza un gusano y su aspecto físico, el cual además incluya sensores blandos en su estructura para obtener información del medio donde se desplaza y guiar sus acciones. Los actuadores y sensores se diseñan (mediante CAD) en función de la idea generada, seleccionando un tipo de actuación, dimensiones, materiales, y otros aspectos.

Se define un proceso de manufactura que permita obtener las componentes diseñadas y se ejecuta. Se cuenta con máquinas de fabricación digital en el FabLab de la Universidad de Chile, estos es, impresoras 3D, torno y cortadoras CNC. Este proceso se considera de calidad si es que las partes obtenidas en serie son similares entre si, no tiende a generar defectos y se lleve a cabo de forma sencilla. Si tales condiciones no se cumplen, considerando que es necesario un elevado número de componentes en buen estado para los ensayos de caracterización y experimentos posteriores, el proceso se modifica.



**Figura 2.1:** Esquema de metodología para ejecutar etapa de desarrollo del robot.

Si las componentes fabricadas no se comporten de la forma que se espera es necesario volver a la fase de rediseño, en caso contrario, se procede a la siguiente etapa.

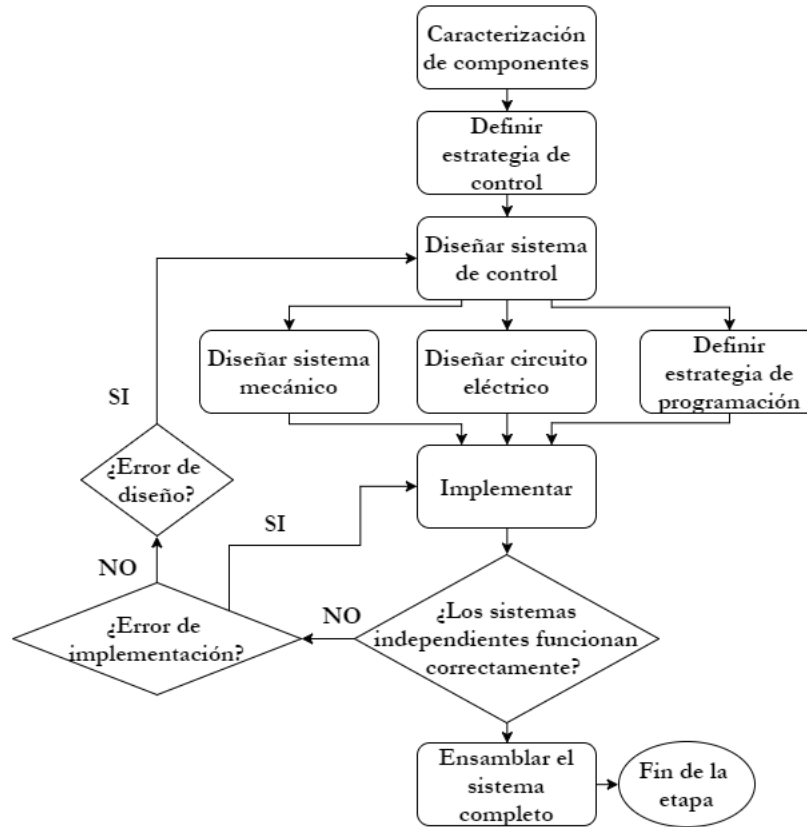
### 2.3. Desarrollo del sistema de control

El flujo de trabajo de esta etapa se observa en la Figura 2.2, la cual se lleva a cabo principalmente en el Laboratorio de Síntesis de Máquinas Inteligentes de la Universidad de Chile, pues cuenta con un stock de componentes electrónicas e instrumentos, como multímetro, osciloscopio, fuentes de poder, actuadores y otros.

Es necesario conocer el sistema que se desea controlar, por lo que al inicio de esta etapa se realizan ensayos de caracterización sobre actuadores y sensores blandos del robot, como por ejemplo, el rango de deformación que poseen, la relación de la señal del sensor con el fenómeno físico que captura, tiempos de respuesta y otros. Los montajes experimentales deben ser fabricados e implementados.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se busca una estrategia de control que permita utilizar la señal de los sensores para que el robot pueda tomar decisiones y desplazarse, generando lazo cerrado.

Dependiendo del tipo de actuador desarrollado en la etapa anterior, se diseña un sistema físico que permita la manipulación de estos, como un circuito neumático o hidráulico, el cual requiere de un circuito eléctrico para que el controlador pueda manejar las componentes de este sistema, así como también adquirir las señales de los sensores. En función de la estrategia de control se escribe un programa que adquiera y procese tales señales, manejando el sistema físico para producir la locomoción del robot.



**Figura 2.2:** Esquema de metodología para ejecutar etapa de desarrollo del sistema de control.

Los sistemas se implementan y se valida el funcionamiento de estos por separado mediante pruebas parciales. Si alguno no funciona, primero se revisan posibles errores durante la implementación, como problemas de cableado o componentes defectuosas. Si el sistema se encuentra en buen estado y no cumple su cometido, se retorna a la fase de diseño. Una vez que se tiene cada subsistema funcional, se procede al ensamble de cada uno junto con el robot.

Se cuenta con el Laboratorio de Electrónica del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile para fabricar la PCB del circuito eléctrico.

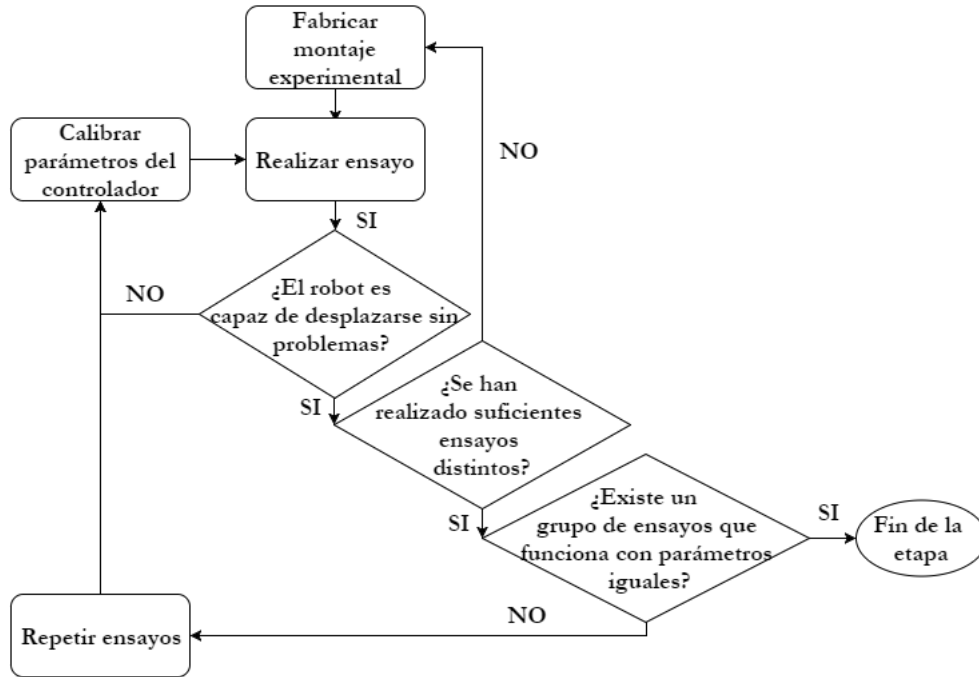
## 2.4. Validación de la idea

El flujo de trabajo se observa en la Figura 2.3.

Se definen y fabrican montajes experimentales para validar el concepto de robot creado. Los parámetros del controlador se calibran hasta que este pueda desplazarse en el entorno

generado. Dado que se tiene como objetivo que un mismo controlador permita que el robot se mueva en distintos ambientes, se fabrican más ensayos hasta que exista un conjunto en el cual esto se logre (al menos en 3), repitiendo los ensayos e iterando los parámetros del controlador. Por los alcances del trabajo, se graba en video cada ensayo realizado.

También se dispone de las máquinas del FabLab para la fabricación de los montajes.



**Figura 2.3:** Esquema de metodología para ejecutar etapa de validación de la idea.

# Capítulo 3

## Antecedentes

### 3.1. Robótica blanda

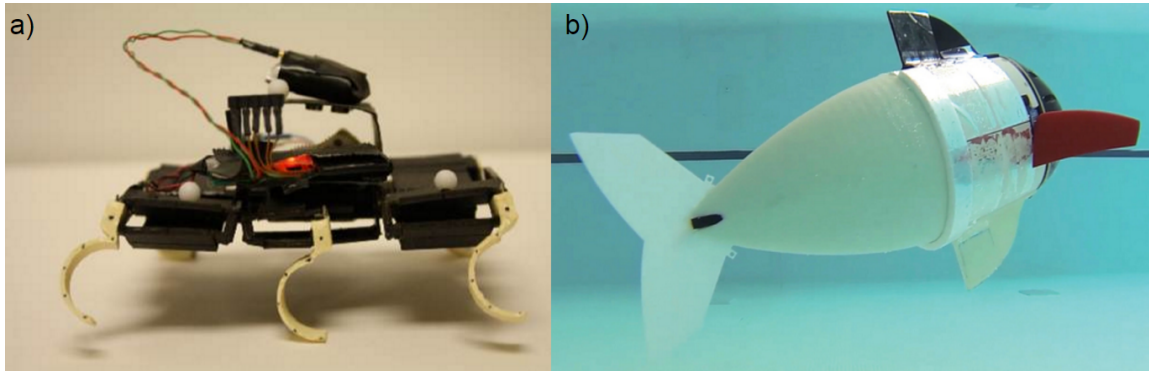
#### 3.1.1. Contexto general

Últimamente, basar el diseño de nuevos robots en formas y mecanismos observados en seres vivos se ha vuelto un método popular, naciendo el área denominada robótica bio-inspirada. Esta reciente categoría toma conceptos de la naturaleza y los transforma para su aplicación en problemas de ingeniería. Buscar soluciones en el reino animal resulta lógico, puesto que los sistemas biológicos han evolucionado durante millones de años hasta su condición actual, luego sus componentes y morfologías se han adaptado de forma óptima para desenvolverse en tareas como locomoción, alimentación y otras más específicas.

De esta área nacen los robots bio miméticos, los cuales buscan emular tanto la apariencia como el movimiento de los seres vivos, frecuentemente para probar nuevas formas de desplazamiento en la robótica. Por ejemplo, se han creado robots que nadan como peces [1], que saltan como canguros [2], que se arrastran como serpientes [3], etc. Para lograr estas semejanzas, muchas veces se utilizan materiales blandos en el cuerpo del robot, es esta característica fundamental la que crea una nueva clase de robótica, la robótica blanda.

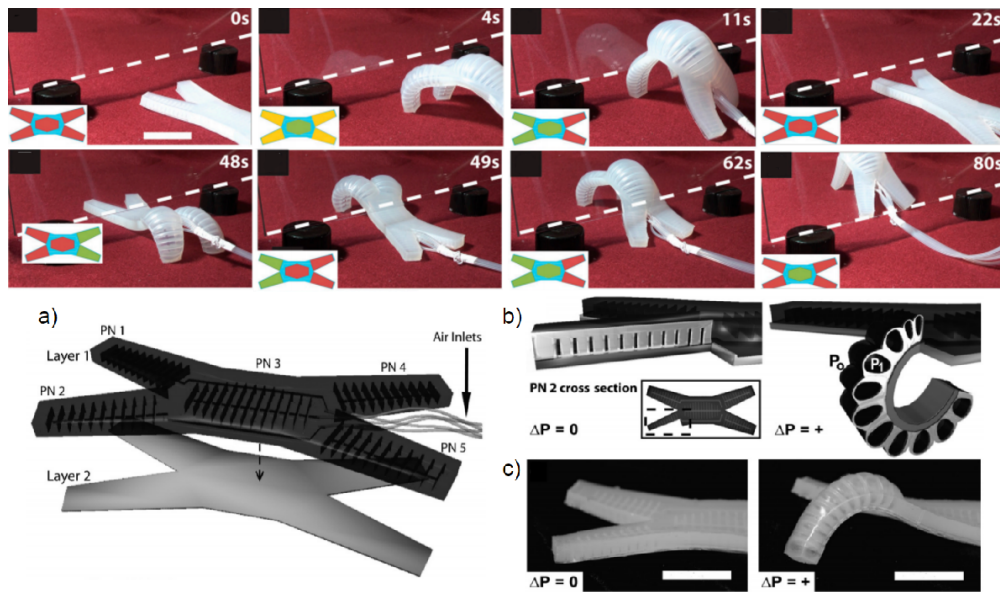
Ejemplos de robots bio-inspirados y bio-miméticos se observan en la Figura 3.1, donde en (a) se muestra un robot inspirado en los movimientos rápidos y maniobrabilidad de la cucaracha [4], el cual se vale del mismo principio de funcionamiento que el insecto (control de la rigidez en extremidades), logrando gran agilidad y velocidad. En (b) se muestra un robot que no sólo parece un pez, sino que se mueve como uno. La actuación de la cola es de acción hidráulica sobre cavidades que se deforman, generando deflexión.

La característica principal de los robots blandos es su estructura, la cual está conformada principalmente por materiales altamente deformables y/o elásticos, lo cual les otorga gran resiliencia, adaptabilidad y bajo costo. Los actuadores muchas veces también son parte integral de la estructura del robot (como un músculo), y pueden ejecutar tareas como deflectarse o extenderse estando constituidos por un sólo elemento, simplificando el sistema.



**Figura 3.1:** Robot bio-inspirado y robot bio-mimético. (a) Robot bio-inspirado *DynaRoACH*, (b) Robot pez bio-mimético. Fuentes: [4] y [1]

Uno de los primeros robots blandos creados se observa en la Figura 3.2 a), el cual puede caminar mediante la acción coordinada de cavidades internas que se deforman por aire comprimido, fabricadas utilizando silicona en moldes impresos en 3D. En b) se observa otra versión del mismo diseño, la cual fue puesta a prueba en distintos escenarios, por ejemplo, el robot es atropellado por un automóvil durante la marcha (tras lo cual continúa desplazándose), caminando sobre nieve y llamas ocasionales, demostrando la gran resiliencia del sistema.

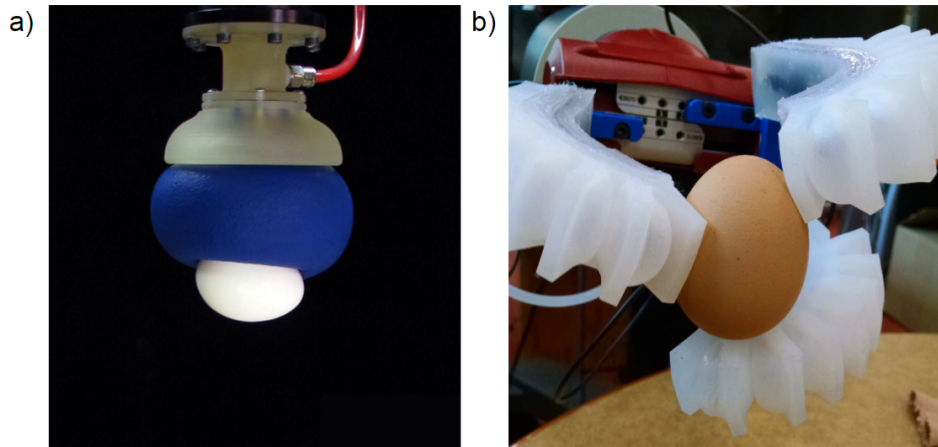


**Figura 3.2:** Robot blando *Crawler*. (a) Diseño original pasando bajo un obstáculo, (b) variante de mayor tamaño probándose en diversas condiciones. Fuentes: [5] y [6].

Las soluciones desde la perspectiva de la robótica blanda han permitido soluciones simples a problemáticas tradicionalmente complejas. Uno de los ejemplos más claros de esto es en sistemas para manipular objetos. Usualmente, las manos robóticas antropomórficas o tipo pinza presentan problemas para sujetar formas irregulares o frágiles, y cuentan con gran cantidad de componentes de actuación, instrumentación y extensa programación. En robótica blanda, se han desarrollado sujetadores deformables neumáticos [7][8] (Figura 3.3), los cuales se adaptan con facilidad y firmeza a la forma de los objetos a sostener, deformándose.

Hasta fechas recientes, no era posible generar un robot autónomo completamente blando,





**Figura 3.3:** Ejemplos de manos desarrolladas en robótica blanda. (a) *Universal Gripper* sujetando un huevo, (b) *Soft Gripper* sujetando un huevo. Fuentes: [7] y [8]

pues se requieren componentes duros, como baterías para almacenar energía, circuitos, controladores actuadores y componentes eléctricas. *Octobot* [9], es un robot similar a un pulpo que se obtiene principalmente de técnicas de impresión 3D, utiliza micro canales con fluidos como controlador [10] de lazo abierto, los cuales manipulan reservas de combustible líquido que al reaccionar producen la expansión de gases y luego la actuación de los tentáculos, al presurizarse las cavidades internas.



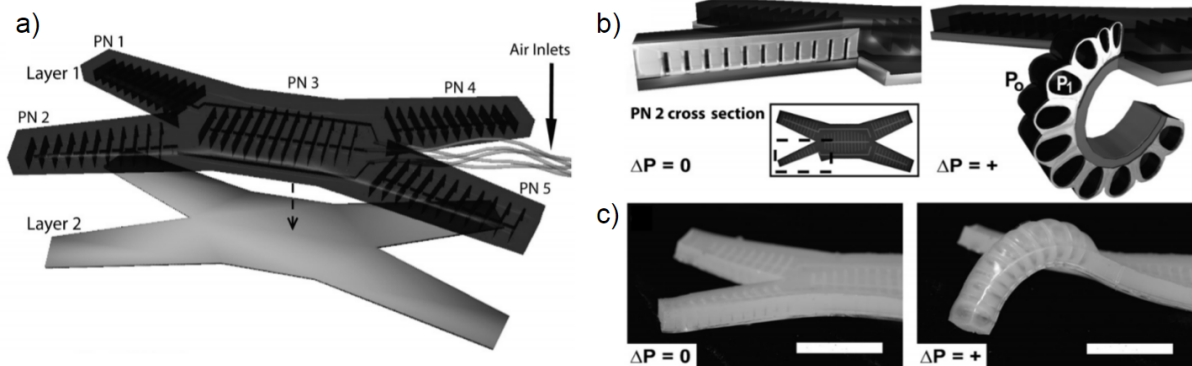
**Figura 3.4:** *Octobot*, el primer robot blando completamente autónomo. Fuente: [9]

### 3.1.2. Actuadores usualmente empleados en robótica blanda

#### Neumática e hidráulica:

Este tipo de actuación utiliza actuadores fabricados de elastómeros, produciendo cavidades internas que al presurizarse se deforman de acuerdo al diseño de estos. El actuador presentará mayor deformación donde la estructura sea localmente más débil, lo que puede ser controlado

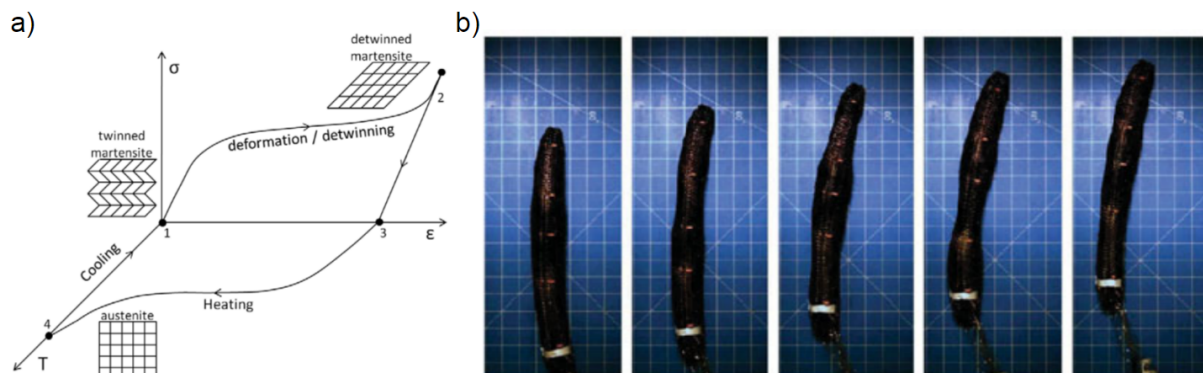
mediante el uso de fibras de refuerzo [11], geometría, espesores, materiales de distinto módulo de elasticidad y otros. En la Figura 3.5 se observa como las cámaras internas de una extremidad del robot Crawler producen deflexión al presurizarse.



**Figura 3.5:** Estructura y funcionamiento de soft-robot Crawler. (a) Estructura del robot, (b) Esquema del funcionamiento de las extremidades, (c) Extremidad actuada a 0.7 psi. Fuente [5]

### Shape Memory Alloy (SMA):

Corresponden a materiales compuestos de dos o más metales aleados que tienen la capacidad de retornar a una forma programada mediante el cambio de su microestructura, producido por variaciones de temperatura. Estos metales son programados deformándolos y sometiéndolos a un tratamiento térmico [12]. En la Figura 3.6 (a) se muestra un esquema del ciclo de funcionamiento. Un ejemplo del uso de actuadores fabricados con estos materiales es el robot Meshworm [13] bio-inspirado en un gusano (Figura 3.6 (b)).

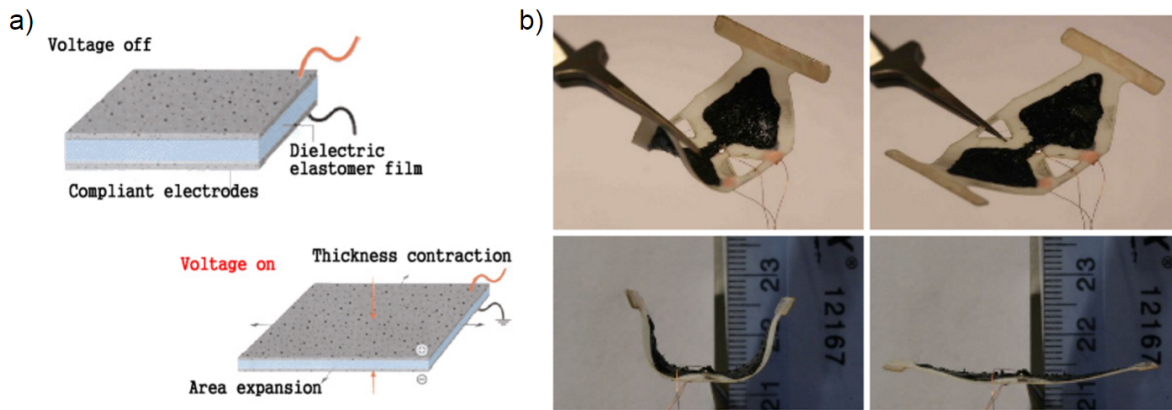


**Figura 3.6:** Aleación con memoria y robot Meshworm. a) Representación de los estados de la aleación con memoria, b) Robot MeshWorm desplazándose, fabricado con nitinol (SMA). Fuente: [12] y [13]

### Elastómero dieléctrico:

Este tipo de actuador está constituido por tres capas, donde las externas son de un material conductor y la interna de un material aislante y elástico, típicamente silicona. Al imponer una diferencia de voltaje entre las capas conductoras, se acumulan cargas opuestas entre estas

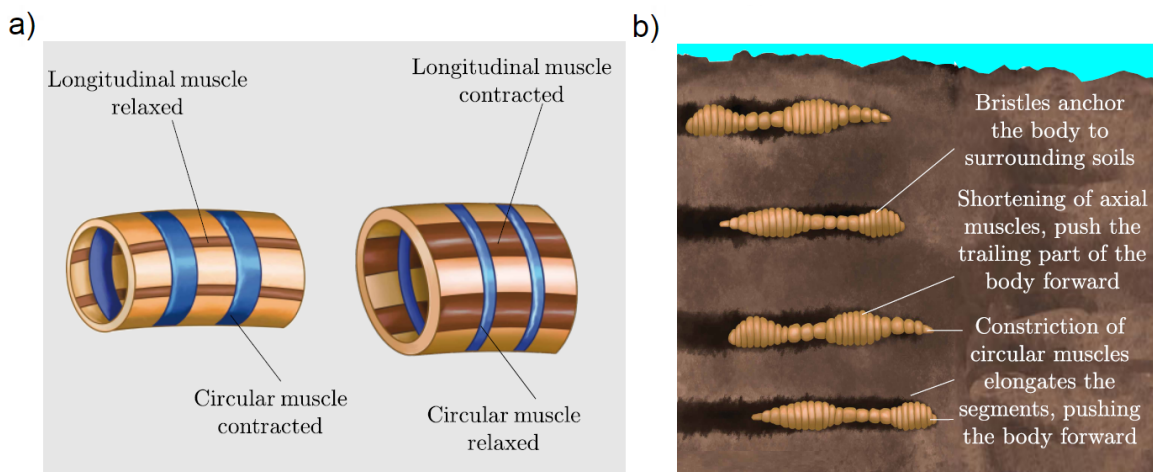
(como un condensador), generando un campo magnético que atrae las capas externas entre sí, Esto aplasta y extiende el aislante, como se muestra en la Figura 3.7 (a), en (b) se observa una componente desarrollada utilizando este tipo de ecuación.



**Figura 3.7:** Esquema de funcionamiento de elastómeros dieléctricos y robot que los emplea. (a) Esquema de funcionamiento de elastómeros dieléctricos, (b) Actuador de elastómero dieléctrico relajado y luego estimulado con voltaje. Fuente: [14]

### 3.2. Morfología de un gusano

Una lombriz de tierra común se compone de varios segmentos iguales llamados metámeros (Figura 3.8 a), los cuales están formados por dos tipos de músculos: longitudinales y radiales. Cuando el músculo longitudinal se contrae y el circular se relaja, el segmento muscular se acorta y aumenta el diámetro (por conservación del volumen, dado que el interior de un gusano es hidrostático [16]); si el músculo circular se contrae y el longitudinal se relaja, el segmento muscular se alarga y disminuye el diámetro.



**Figura 3.8:** Esquema de locomoción de un gusano. (a) Metámero de un gusano (b) Secuencia de movimiento de un gusano al enterrarse. Fuente: [15]

Como se observa en b), el gusano logra moverse mediante un movimiento peristáltico. Primero, ancla mediante roce la parte frontal de su cuerpo al aumentar el diámetro del metámero,

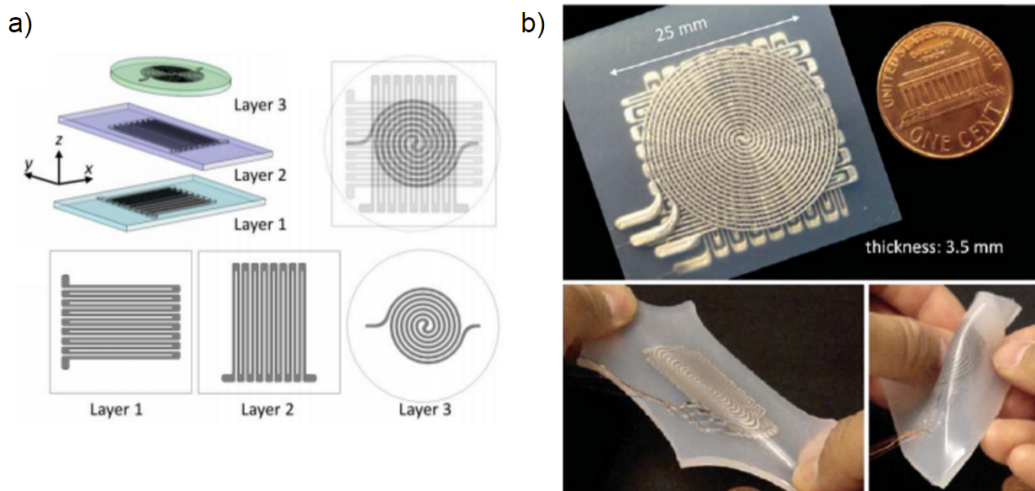
luego, las secciones anteriores a esta se acortan longitudinalmente, desplazando el cuerpo hacia adelante. Finalmente, las secciones que estaban ancladas se extienden longitudinalmente y se repite el ciclo, anclando la parte frontal nuevamente.

### 3.3. Sensores blandos

El desarrollo de sistemas blandos también se ha dado en el área de electrónica e instrumentación. Uno de los desafíos actuales es fabricar placas de circuitos electrónicos deformables, para así disminuir su fragilidad, dar más comodidad al portador de dispositivos, facilitar su adhesión a superficies irregulares, entre otros. Esto es especialmente útil para la tecnología vestible, lo cual corresponde a ropa o accesorios con algún sistema electrónico integrado, para generar energía, monitorear estados de salud [17], etc.

Los sensores y otros componentes blandos también resultan más atractivos para ser utilizados sobre seres humanos y animales, puesto que son menos invasivos y capaces de causar daño que sus pares rígidos. Una aplicación particular de este tipo de sensor es su uso para miografía de superficie, una técnica no invasiva para obtener señales de la contracción de músculos esqueléticos. Por ejemplo, se ha desarrollado un electrodo flexible y delgado [18] que permite a una persona controlar un Quadcopter realizando ciertos movimientos corporales.

Una de las aplicaciones más importantes para este tipo de tecnología es en la implementación de sentido táctil en prótesis y robots. En la Figura 3.9 se observa uno de estos sensores [19], el cual posee microcanales rellenos de metal líquido conductor dentro de una matriz blanda. El sensor cambia su resistencia al ser deformado, puesto que esta depende del largo y área transversal del conductor, como indica la ecuación de la resistencia eléctrica (3.1). Debido a las reducidas dimensiones de los canales de los sensores es que se requiere de impresión 3D de alta calidad o corte láser para su manufactura.



**Figura 3.9:** Sensor blando de presión y deformación, fabricado con silicona y metal líquido Indio-Galio. (a) Esquema del sensor, (b) Sensor fabricado. Fuente: [19]

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (3.1)$$

Siendo  $R$  la resistencia en  $\Omega$ ,  $\rho$  la resistividad,  $L$  el largo y  $A$  el área de la sección transversal.

Este sensor esta formado por 3 capas de canales compuestas de resina de silicona, rellenas con una aleación eutéctica de metal líquido de nombre comercial EGaIn. La primera y segunda capa permiten medir deformación preferentemente en el sentido de las líneas más largas ( $x$  e  $y$  respectivamente, de acuerdo a los ejes de la Figura), mientras que la tercera es más sensible a presión.

La Figura 3.10 exhibe los resultados del ensayo experimental de este sensor. Se observa mayor sensibilidad y un comportamiento bastante lineal de las capas de sensores unidireccionales al ser deformados en la dirección de sus líneas más largas. El sensor de presión es a su vez más sensible a la presión normal, pero con un comportamiento marcadamente no lineal, pues la señal permanece prácticamente constante hasta cierto nivel de presión, tras lo cual se alza notablemente. También presenta mayor histéresis.

La ecuación que modela el cambio de resistencia en un canal de sección rectangular ante estiramiento se expresa en 3.2, mientras que el cambio respecto a presión en 3.3.

$$\Delta R = \frac{\rho \epsilon L (8 - \epsilon)}{wh(2 - \epsilon)^2} \quad (3.2)$$

Siendo  $\Delta R$  el cambio de resistencia,  $L$  el largo del canal,  $w$  el ancho,  $h$  la altura,  $\rho$  la resistividad eléctrica y  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$  ( $\Delta L = L_f - L_i$ ).

$$\Delta R = \frac{\rho \epsilon L}{wh} \left\{ \frac{1}{1 - (2(1 - \nu^2)wp/Eh)} - 1 \right\} \quad (3.3)$$

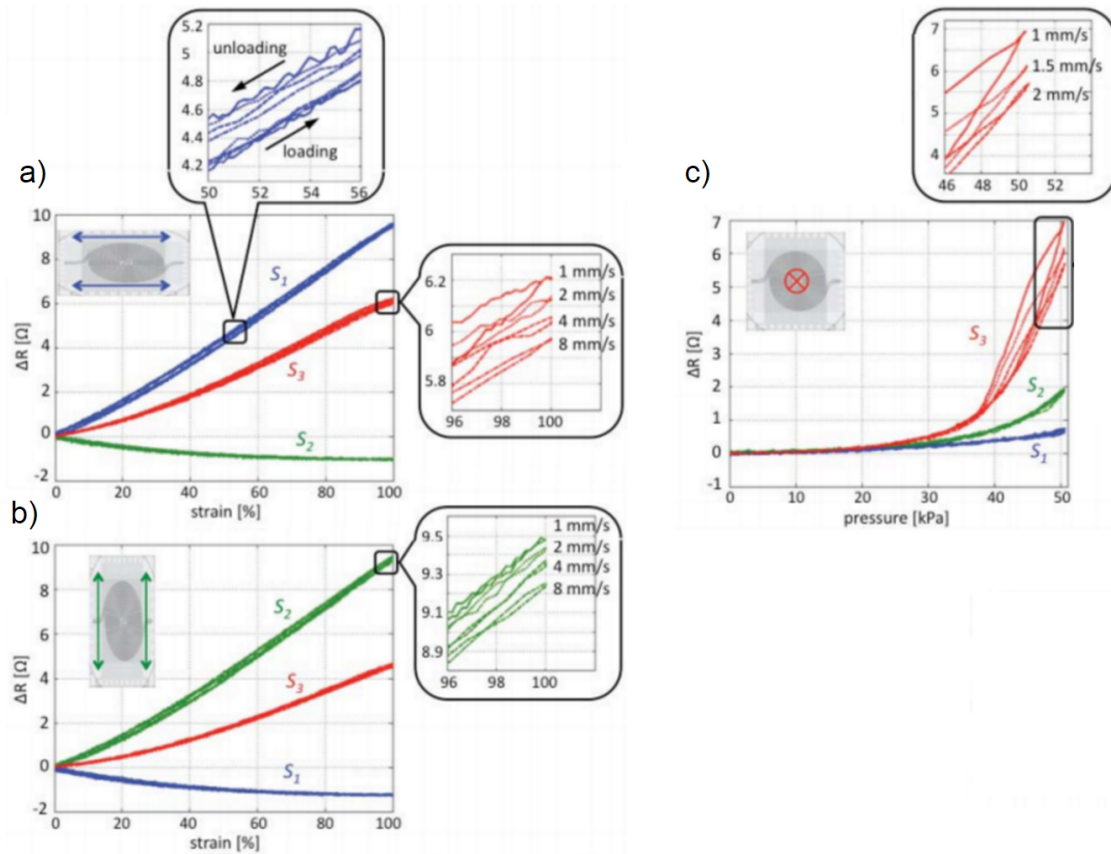
La presión aplicada es  $p$ ,  $E$  el módulo de elasticidad del elastómero y  $\nu$  el coeficiente de Poisson.

También se han fabricado sensores blandos resistivos similares a los de Park et al., mediante un único proceso de impresión 3D, inyectando el metal líquido y trazando los canales mediante un cabezal con jeringa y aguja sobre silicona fresca en la bandeja de impresión [20]. Esta forma de impresión se denomina impresión 3D embebida.

## 3.4. Control de sistemas

### 3.4.1. Sobre teoría de control

El control de sistemas es una disciplina de la ingeniería que tiene por objetivo controlar sistemas dinámicos, como máquinas, procesos industriales, robots y otros. Esto se logra mediante el estudio del comportamiento del sistema, también llamado planta, ante los estímulos o señales que recibe (*input*) y la respuesta que desencadena (*output*).



**Figura 3.10:** Resultados experimentales para sensor blando. (a) Elongación en sentido X, (b) Elongación en sentido Y, y (c) Presión en sentido Z. Fuente: [19]

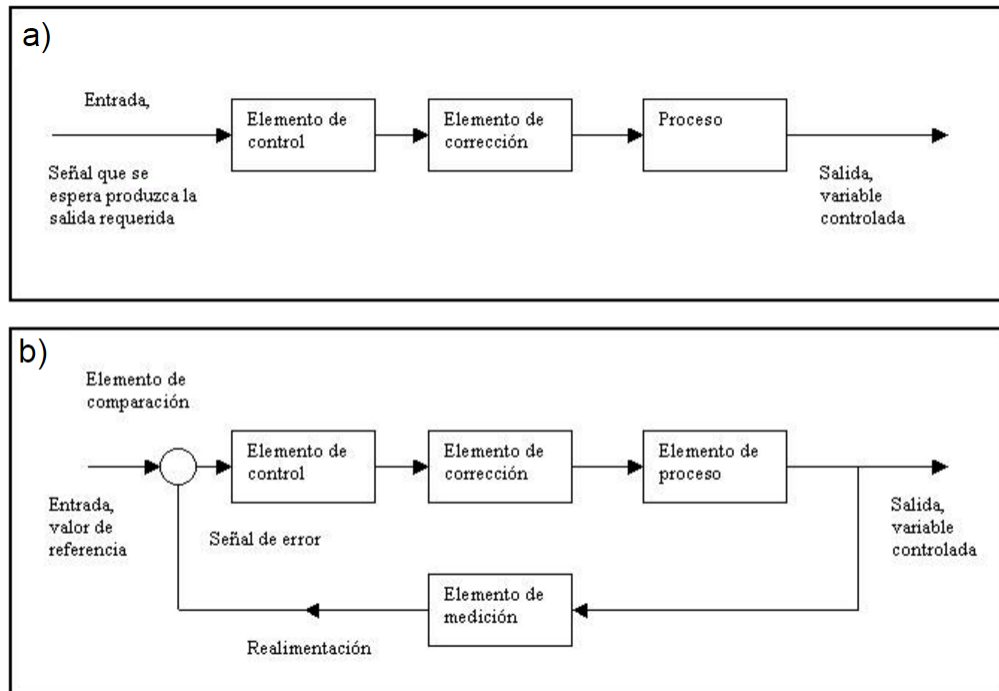
La intención del control suele ser que el sistema ejecute una acción deseada o referencia y sea capaz de corregir su actuar en función de esta, dependiendo del estado actual en el que se encuentra y/o su diferencia con lo requerido (error). Por ejemplo, a un simple horno de cocina se le indica la temperatura a la que debe calentarse y este controla la corriente en los calefactores que generan el calor para alcanzar y mantenerse en el estado deseado [21].

Los sistemas de control están usualmente constituidos por un controlador, que procesa la señal de referencia y envía la respuesta hacia un actuador, el cual realiza una acción correctiva sobre la planta o proceso. A esta dinámica se le conoce como controlador de lazo abierto, representada en la Figura 3.11 (a).

Otro elemento común son los sensores, los cuales registran el estado de la planta. Si esta información se envía al controlador y afecta la señal de control que regula el actuador, se tiene entonces un sistema de lazo cerrado como se muestra en (b). Estos dos tipos de control son los principales en la teoría de control.

Un sistema de control también se ve afectado por fenómenos indeseados, como perturbaciones físicas en la planta, ruido electromagnético en la señal de sensores, deterioro de las componentes que conforman el sistema, entre otros, los cuales deben ser considerados en el modelo y en la estrategia de control a usar. Un sistema en lazo abierto no puede corregir su

<sup>1</sup><http://eet602ei.blogspot.cl>



**Figura 3.11:** Diagrama de bloques de control. (a) En lazo abierto y (b) En lazo cerrado.<sup>1</sup>

estado frente a perturbaciones por si mismo, pues sus respuestas son limitadas a instrucciones conocidas.

### 3.4.2. Tipos de control de lazo cerrado

#### Control lógico

El controlador recibe y envía señales de acuerdo a operaciones lógicas programadas, siguiendo una secuencia. Es la forma más común para controlar procesos industriales, como maquinaria, implementada frecuentemente en una variedad de PLC's (Programmable Logic Controller), un computador especializado para las condiciones de la industria. Por ejemplo, un contenedor con líquido alcanza cierta temperatura, un sensor envía la señal al controlador y determina el encendido de una bomba para mover el fluido a una cámara de mezclado, apagando el equipo anterior y encendiendo el actual.

Una de las formas para facilitar la programación de este tipo de control es utilizando *state logic*, basado en los diagramas de estado. Con este método, se definen los posibles estados del sistema y las condiciones que permiten la transición entre ellos.

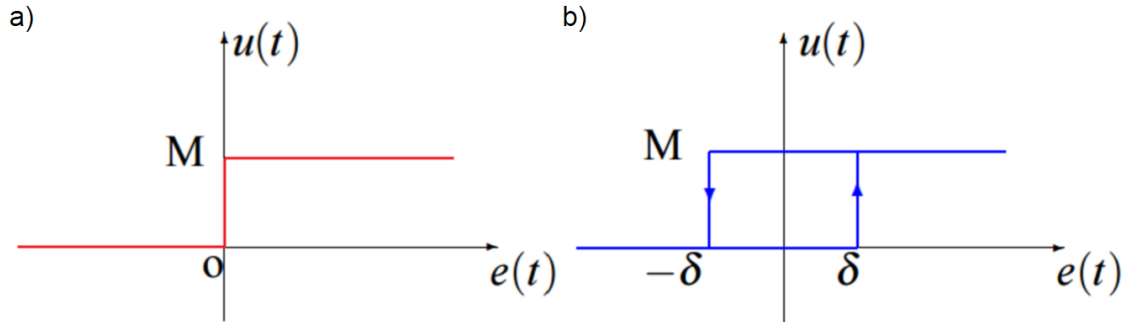
#### Control On/Off

El controlador utiliza señales digitales sobre los actuadores, encendiéndolos o apagándolos de acuerdo a un umbral fijado para el estado de la planta. Este tipo de control es muy simple

de implementar, puesto que sólo existen dos estados sin intermedios. Matemáticamente, esto se expresa como indica la ecuación 3.4 y representado en el diagrama de la Figura 3.12.

$$u(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } e(t) < 0 \\ M & \text{si } e(t) > 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Siendo  $e(t)$  la señal de error en función del tiempo,  $u(t)$  el estado del actuador, y  $M$  el estado encendido.



**Figura 3.12:** Representación gráfica del estado de un sistema On/Off respecto a la variable de error (a) sin histéresis y (b) con histéresis.

Si el estado de un actuador depende únicamente de un punto es probable que este cambie muy rápidamente entre el encendido y apagado al alcanzar esa referencia (error cero), si es que el sistema tiene poca inercia o/y existe ruido en la señal del sensor (propagándose al error), lo cual puede dañar severamente a los componentes. Es por esto que se incorpora histéresis respecto al punto de referencia, como se observa en la Figura 3.13. La expresión matemática cambia como indica la ecuación 3.5.

$$u(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } e(t) \leq -\delta \\ M & \text{si } e(t) \geq \delta \end{cases} \quad (3.5)$$

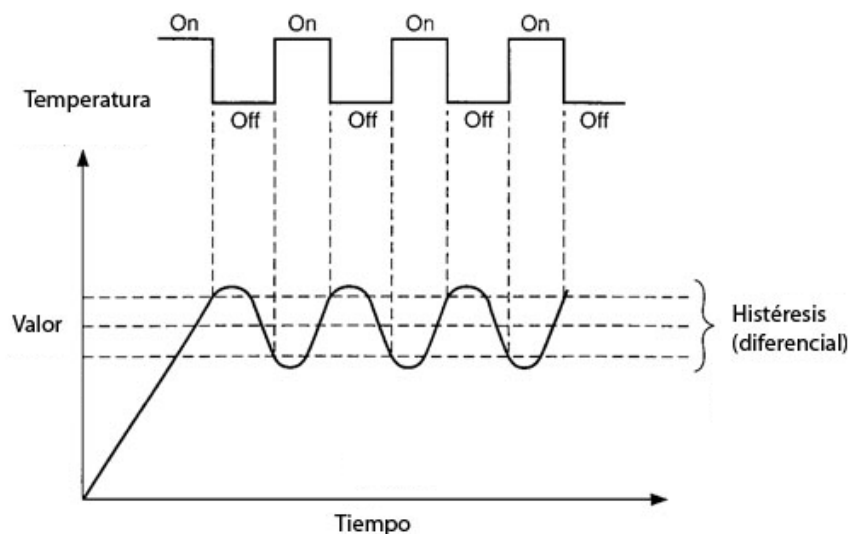
Siendo  $\delta$  el nivel de histéresis. Esto agrega un retardo temporal y un umbral a la activación del actuador, evitando el encendido/apagado rápido. Naturalmente, esto trae como consecuencia que el sistema reaccione más lento y oscile en torno al punto de referencia. A mayor nivel de histéresis esta oscilación sería de menor frecuencia, pero mayor amplitud, y viceversa. Luego, está comprometida la velocidad de respuesta respecto a la precisión en el *set point*.

En la Figura 3.13 se puede apreciar la existencia de sobrepaso u *Overshoot* respecto a los valores fijados de histéresis, esto es común en todos los sistemas de control y es ocasionado por la inercia de la planta y el retardo en la acción de actuadores.

Este es el caso de muchos sistemas de control de temperatura, como el caso del horno, se desea llegar a una temperatura y el horno enciende el calefactor hasta que se apaga al alcanzar

<sup>II</sup><http://www.sapiensman.com>





**Figura 3.13:** Ejemplo de curva de un sistema de control On/Off respecto a la variable temperatura.<sup>II</sup>

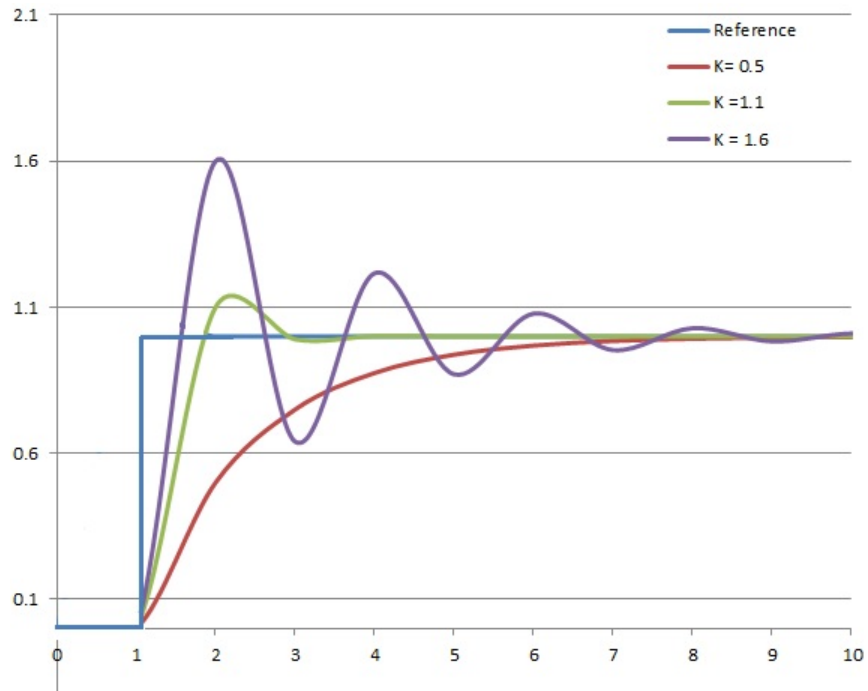
un valor superior al fijado, luego, si la temperatura cae por debajo de otro nivel de referencia inferior al deseado el calefactor se vuelve a encender.

### Proporcional

En este tipo de control, la salida del controlador hacia el actuador es proporcional a la señal de error, como indica la ecuación (3.6), con  $K_p$  la ganancia y  $e(t) = u(t) - x(t)$  (siendo  $x(t)$  la referencia). A diferencia del control On/Off, puede corregir un pequeño error de forma más sutil, reduciendo el tiempo en que este tiende a cero. Para valores muy pequeños de error, la señal proporcional podría volverse despreciable para realizar una corrección en el sistema, generando un error estacionario remanente [21], como se observa en la Figura 3.14.

$$u(t) = e(t)K_p \quad (3.6)$$

Mientras más elevado sea el valor de la ganancia, el sistema corrige más rápido y es más sensible a valores pequeños de error, pero generando sobrepasos más grandes (lo que puede ser dañino) y posible inestabilidad, luego existe un compromiso entre tales pares de características. Por tales razones, este tipo de control por si solo no es recomendable cuando la planta puede ser afectada por perturbaciones súbitas o/y grandes.



**Figura 3.14:** Curva típica de un controlador proporcional ante distintos niveles de ganancia.<sup>III</sup>

<sup>III</sup><http://ctms.engin.umich.edu>

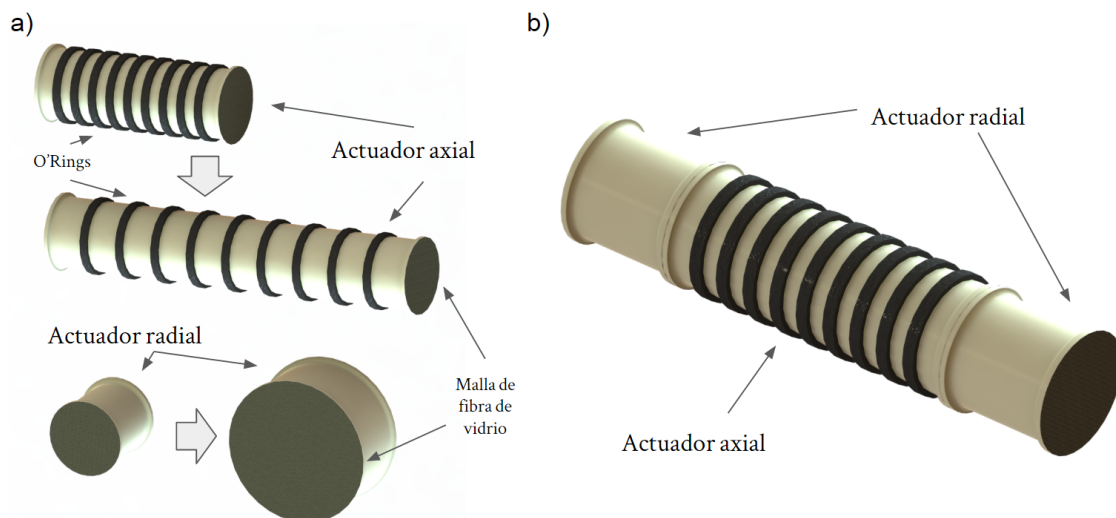
## Capítulo 4

# Diseño, fabricación y caracterización de actuadores y sensores

### 4.1. Diseño

#### 4.1.1. Diseño de actuadores

Se emula el funcionamiento de un metámero (ver sección 3.2) a través de dos estructuras, un actuador de deformación preferente radial y otro axial, se observan en la Figura 4.1 (a). Al disponer un actuador axial entre dos radiales (b), se forma un sistema que puede imitar el movimiento peristáltico de un gusano, de acuerdo al diagrama de fases en la Figura 4.2.



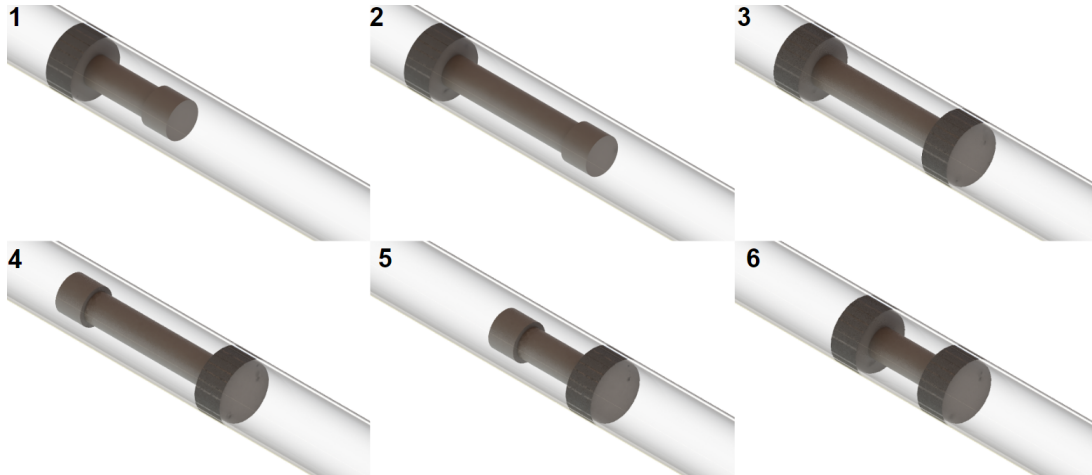
**Figura 4.1:** Concepto de robot blando. (a) Actuadores neumáticos (b) Robot.

Antes de entrar en el ciclo, el robot se ancla a la cavidad expandiendo el actuador radial

trasero (o cola), posteriormente estira el actuador axial (2) y ancla el actuador radial delantero (3) (o cabeza). Con la cabeza del robot anclada, relaja la cola (4) y el axial (5), para volver a aferrarse con la cola (6). Finalmente, relaja la cabeza (1) y continúa con el ciclo.

Los actuadores son neumáticos, funcionando mediante la presurización de una cavidad interna que ocasiona la deformación de la estructura, la cual es de silicona altamente deformable. Los actuadores son cilíndricos (para ser semejantes al cuerpo de un gusano) y las dimensiones se eligen arbitrariamente (Tabla 4.1).

Los actuadores neumáticos se comportan de forma opuesta a un músculo, ya que este último se acorta al activarse, mientras que los actuadores experimentan esfuerzos y deformación en todas las direcciones por la presión interna. Para controlar este fenómeno, el actuador axial se cubre de O'Rings en el manto, evitando la deformación en el sentido radial. Las tapas de ambas estructuras cilíndricas se refuerzan con malla de fibra de vidrio, para minimizar su deformación. El actuador radial no se refuerza para prevenir deformación axial.



**Figura 4.2:** Fases en un ciclo de movimiento.

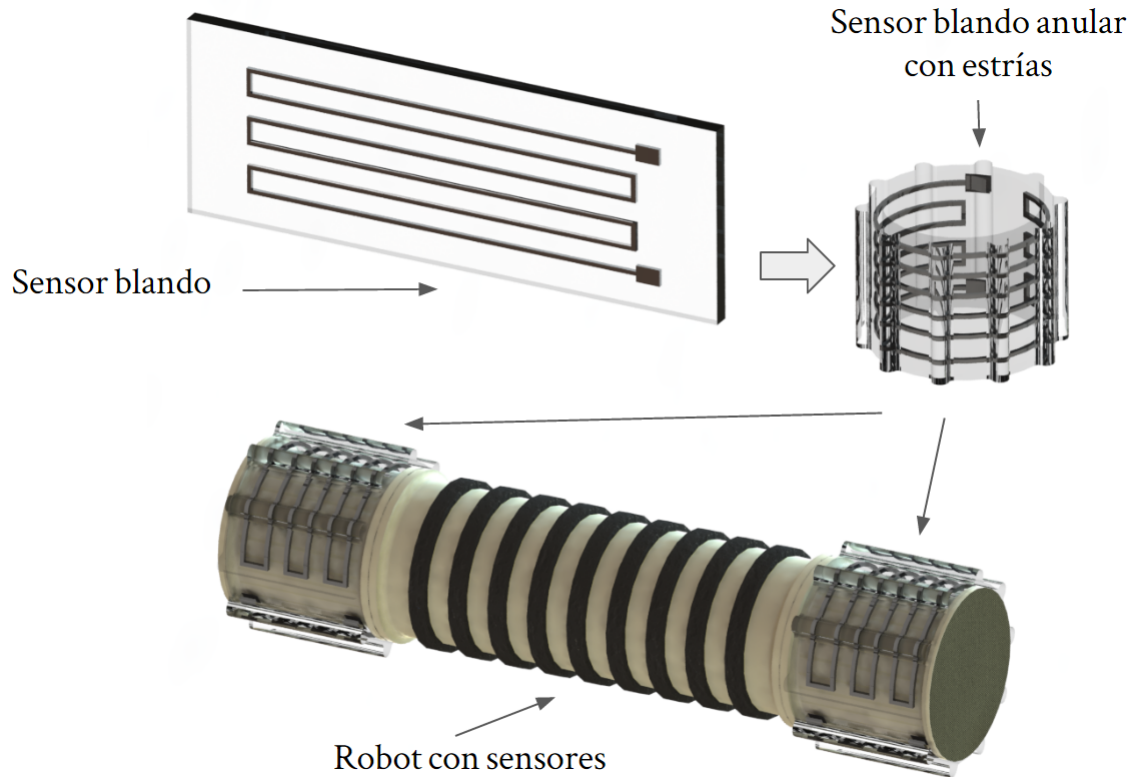
El sistema de control y componentes neumáticas son externas al robot, para simplificar el diseño, además de mantener la resiliencia y flexibilidad de su estructura blanda. Los actuadores son alimentados mediante mangueras (de 3 milímetros de diámetro exterior) que atraviesan el cuerpo del robot desde el actuador trasero hacia el delantero. No se requieren componentes extra para la conexión de los actuadores, puesto que el material de los mismos sella la perforación de las mangueras, las cuales deben tener forma espiral para permitir la extensión de los actuadores.

**Tabla 4.1:** Dimensiones principales de actuadores de robot gusano, en milímetros.

Dimensión	A. axial	A. radial
Diámetro	21	19
Largo	37	15
Espesor en manto	3	3
Espesor en tapas	5	5

### 4.1.2. Diseño de sensores

Con el fin de reconocer el contacto del robot con las paredes de una cavidad, se ubican sensores blandos en el manto de los actuadores radiales. Se imita el diseño de sensores de deformación unidireccional desarrollado por Park *et al.*, dado que al ser dispuestos como indica la Figura 4.3 la señal sería directamente proporcional al aumento de radio durante el período en el cual el actuador se expande libremente.



**Figura 4.3:** Esquema de robot con sensores blandos acoplados.

Cuando el actuador entre en contacto con alguna pared la señal del sensor modificará su comportamiento, dado que la extensión del músculo neumático (y del sensor) deja de ocurrir en la misma dirección. La restricción del volumen del actuador y el constante flujo de aire incrementan la presión interna y contra la pared. Se decide ubicar una banda estriada de silicona en su superficie externa, de esta forma las estrías concentran la presión y estrangulan los canales de metal líquido. La reducción del área transversal del canal implica un aumento de la resistencia (ecuación 3.1), por lo que se espera un alza en la señal.

Por lo anterior, la señal del sensor presentará dos comportamientos, uno lineal durante la expansión libre, y una saturación acelerada tras el contacto, la cual dependerá de la forma y tamaño de las estrías. Luego, para la dinámica de funcionamiento del robot se discriminará entre los dos comportamientos comparando la pendiente de la señal.

El diámetro de los sensores y banda estriada es ligeramente inferior al de actuadores, de esta forma, se estiran y se acoplan al manto de estos últimos fácilmente, sujetándose por fuerza elástica.

Es conveniente diseñar el área transversal de los canales del sensor con la medida más pequeña posible, pues de esta forma se reduce el volumen de metal por unidad de largo. Reducir el área y aumentar el largo es favorable para notar un cambio en la resistencia al estirar el sensor, de acuerdo a la ecuación 3.2. La desventaja de utilizar una sección transversal muy pequeña es el posible bloqueo de los canales durante el proceso de manufactura, puesto que cualquier partícula de suciedad o silicona líquida podría intervenir notablemente, el tamaño de la sección también está limitado a la precisión de la máquina a emplear para fabricar los moldes.

Las dimensiones principales de los canales del sensor se observan en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2:** Dimensiones de canales en sensor blando diseñado. Con  $w$  el ancho del canal,  $h$  el alto,  $l_1$  el largo de las líneas más largas,  $l_2$  el de las más cortas y  $l_{tot}$  el largo completo del canal.

Entidad	Largo[mm]
$w$	0.5
$h$	0.5
$l_1$	48
$l_2$	2.5
$l_{tot}$	300.5

Dadas las dimensiones seleccionadas, las propiedades eléctricas del metal líquido (Anexo A) y utilizando la ecuación 3.1, se calcula la resistencia teórica del sensor, dando como resultado aproximadamente  $0.35 \Omega$ .

Se seleccionan segmentos de cables eléctricos delgados con recubrimiento compuestos de varias hebras finas para conectar el sensor, pues de esta forma es más flexible que uno de una sola hebra, con lo que el movimiento del cable dentro del terminal influye menos, además de resistir mejor la tensión y fatiga. Esto es relevante, puesto que el robot se desplaza y sus circuitos están estáticos y separados del cuerpo. Los cables se reciclan de un dispositivo electrónico, y poseen las características indicadas en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3:** Características de segmentos de cable eléctrico seleccionado.  $s/r$  indica sin recubrimiento plástico.

Entidad	
Largo	25 [mm]
Diámetro	0.5 [mm]
Diámetro $s/r$	0.2 [mm]
Resistencia	0.25 [ $\Omega$ ]

En el Anexo A se entregan enlaces de la información técnica de cada componente utilizado en el robot.

## 4.2. Fabricación de componentes

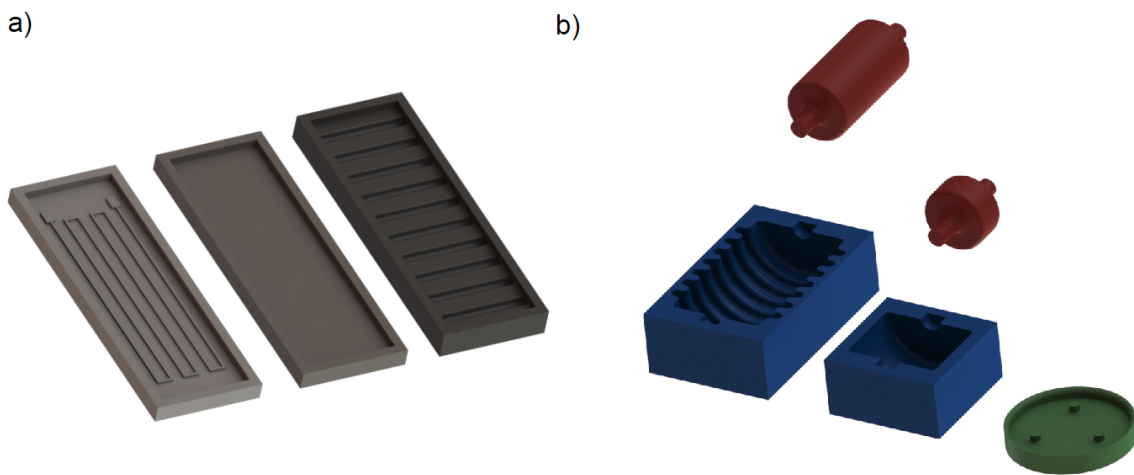
Estas componentes se obtienen de un proceso de moldeo, en el cual se vierte resina de silicona en moldes impresos en 3D. Se diseñan los moldes utilizando el programa SolidWorks

(Figura 4.4), los planos se adjuntan en el Anexo B.

Dada la complejidad de generar el sensor con forma anular, este se diseña como una lámina plana para luego unir sus extremos. Se generan 3 piezas (a), una para producir los canales, otra para fabricar una lámina plana que cierra los canales, y una tercera para la banda estriada.

Los actuadores también requieren de tres piezas (b), una que define el exterior de la componente (en azul), otra que se ubica dentro de la primera y genera la cavidad interna (en rojo), y otra para la tapa (en verde).

Se utiliza una impresora 3D Objet30 de Stratasys para fabricar el negativo de los canales, y una Replicator 2 de Makerbot para el resto de los moldes, dado que no requieren de alta precisión (Anexo A).



**Figura 4.4:** Modelo 3D de moldes para componentes. (a) Moldes para sensores, respectivamente de izquierda a derecha, molde para canales, lámina plana y lámina estriada. (b) Moldes para actuadores.

El proceso de fabricación se observa en la Figura 4.5. Se utiliza silicona EcoFlex 0030 de la marca Smooth On para los sensores y la banda, mientras que para los actuadores se usa EcoFlex 0050. El par de reactivos de este material se mezcla en partes iguales y se deposita en cada molde, tras lo cual son degasificados para evitar burbujas en las piezas.

Para la fabricación de los actuadores, en (a) y (b), se deposita silicona fresca en el molde y se acopla una pieza central (en rojo) para formar la cavidad interna a presurizar (Paso 1). Luego de que la silicona cure, se retira esta pieza junto con el medio cilindro de silicona formado (Paso 2). El proceso se repite, depositando la pieza central volteada (Paso 3), de esta forma se genera la segunda mitad y se adhiere a la primera (Paso 4).

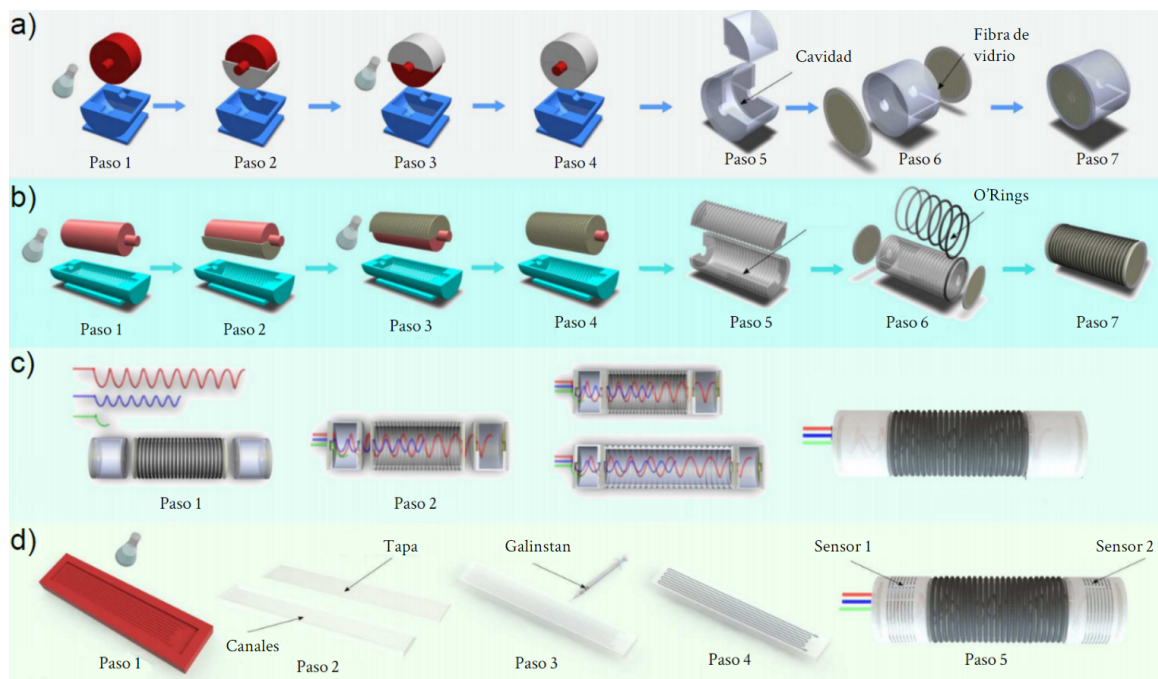
La pieza central se retira de los cilindros de silicona (Paso 5) a través de uno de los pequeños orificios en las tapas, lo cual es posible por la gran elasticidad del material. Se corta un trozo de malla de fibra de vidrio y se ubica dentro de un molde circular (En verde en Figura 4.4) con silicona fresca, para formar la tapa del cilindro. Una vez que se curan estas tapas, se pegan al cilindro utilizando silicona líquida (Paso 6), completando la fabricación de un actuador radial.

El actuador axial se fabrica exactamente de la misma forma, con la excepción del posterior acople de o’Rings en los surcos de su manto estriado en el Paso 6.

Para el ensamble del robot (c), primero se debe termoformar las mangueras, a través estas se pasa un alambre delgado, se le da una forma espiral y se calienta con pistola de calor (Paso 1) . Estas mangueras perforan las tapas correspondientes del robot a través de una pequeña punción que se estira (Paso 2), luego se cosen y pegan con silicona fresca las uniones entre actuadores. Las mangueras deben ser espirales para permitir la extensión del actuador axial, como se observa en la ilustración a la derecha del Paso 2. El resultado final se observa en la imagen más a la derecha en (c).

En sensores (d), se vierte la silicona fresca en los 3 tipos de moldes y se degasifica (Paso 1). Posteriormente, se mezcla una pequeña cantidad de silicona y se deposita sobre la lámina plana, esparciéndola con una espátula para generar una capa muy delgada, sobre la cual se adhiere cuidadosamente la silicona con canales por el lado abierto (Paso 2).

Una vez que la cavidad está conformada dentro de la silicona, se inyecta el metal líquido a través de uno de los terminales usando una jeringa (Paso 3). Luego, se introducen cables por los los terminales y se fijan con silicona fresca. La banda estriada se produce de forma similar, tanto esta componente como los sensores son cosidos entre sus extremos para adquirir una forma de manto cilíndrico, tras lo cual se acoplan al robot (Paso 4).



**Figura 4.5:** Esquema de proceso de fabricación de componentes y ensamble del robos. (a) Proceso de fabricación de actuadores radiales, (b) de axiales, (c) ensamble del robot, (d) sensores blandos.



## 4.3. Ensayos de caracterización

### 4.3.1. Mediciones directas

Se miden las dimensiones físicas de los actuadores y sensores producidos, de esta forma es posible analizar la calidad del proceso de manufactura, observando la desviación en las muestras y considerando las dimensiones planeadas en el diseño. Lo mismo con la resistencia eléctrica de los sensores.

#### Objetivo

- Obtener un valor de referencia para la resistencia de sensores blandos.
- Obtener las dimensiones reales de actuadores y sensores.

#### Montaje

Para medir la resistencia eléctrica se utiliza un multímetro, para medir las dimensiones un pie de metro.

#### Procedimiento experimental

Se mide la resistencia eléctrica de cada sensor ubicando las puntas del multímetro en los cables. Al valor leído en el instrumento se le debe restar la resistencia de cada segmento de cable eléctrico utilizado.

Se mide el diámetro y largo en los actuadores, con y sin sensores montados en los actuadores radiales. Se toma un valor cuidando que el pie de metro no deforme a la componente. En sensores se mide diámetro, altura y espesor.

### 4.3.2. Curva resistencia-deformación de sensores

De acuerdo a los antecedentes revisados, se espera que la señal del sensor estirándose en la dirección más larga de los canales incremente en forma lineal con la deformación. Conocer este comportamiento es vital para discriminar el inflado libre del actuador radial respecto a cuando ocurra contacto, el principio de funcionamiento del robot. Conocida la relación resistencia-deformación es posible saber el diámetro de los actuadores en tiempo real, previo al contacto, o bien, tener información del sensor para plantear su uso en nuevas aplicaciones.

Si bien, se mide voltaje directamente, es posible modelar la resistencia mediante las ecuaciones que caracterizan el circuito eléctrico implementado y los sensores.

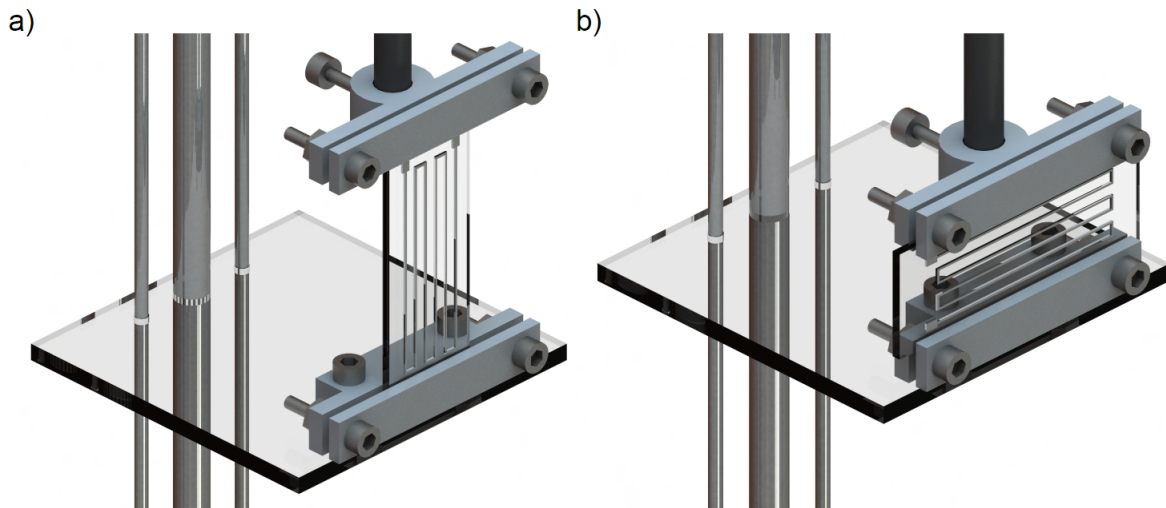
Se realizan estiramientos controlados del sensor, a lo largo y ancho, midiendo la deformación y la señal simultáneamente. De esta forma también se puede registrar la longitud máxima del sensor antes de su rotura.

## Objetivo

- Obtener un gráfico y un modelo que indique como cambia el voltaje del sensor respecto a la deformación.

## Montaje

Los extremos del sensor se fijan a una impresora 3D a través de prensas impresas en 3D (Figura 4.6), donde la inferior se aperna a la bandeja de la impresora, la cual es móvil, y la superior se empotra a una pieza (en negro) que se acopla al cabezal de la impresora. La bandeja asciende y desciende controladamente a través de instrucciones en código G<sup>1</sup> (lenguaje de máquina). La señal del sensor se amplifica a través de un circuito, con los valores de la y se adquieren los datos en milivolts en un Arduino UNO. La topología del circuito de amplificación se describe en el Anexo B, mientras que en el Anexo A se dan enlaces de información técnica de otros instrumentos utilizados.



**Figura 4.6:** Esquema de montaje para extensión de sensor blando. a) Extensión a lo largo b) Extensión a lo ancho.

Para coordinar la toma de datos, el Arduino UNO envía una señal a la impresora para empezar con el ensayo, la cual repite el estiramiento y relajación a velocidad controlada 10 veces.

---

<sup>1</sup><http://reprap.org/wiki/G-code/es>

## Procedimiento experimental

1. Montar el sensor en la impresora, cuidando que las prensas sujeten la silicona pero no los canales del sensor.
2. Definir el desplazamiento del eje Z y velocidad en el código G.
3. Energizar el circuito de amplificación.
4. Enviar un carácter cualquiera a través del monitor serial del Arduino UNO.
5. Esperar a que el ensayo termine.
6. Quitar la energía al circuito de amplificación.

### 4.3.3. Respuesta al impulso de sensores

Conocer la velocidad de respuesta del sensor limita las posibles aplicaciones que se le puedan dar, una respuesta muy lenta en comparación al fenómeno que se está midiendo no permite controlar efectivamente un sistema. En este caso, la velocidad de inflado del actuador (y por ende, del robot) dependerá del flujo que reciba de aire comprimido, lo cual es variable. Es deseable que el robot funcione lo más rápido posible.

Para obtener esta característica, se registra la señal del sensor mientras se deforma rápida y controladamente, ante un estímulo conocido.

## Objetivo

- Estimar la velocidad de respuesta del sensor.

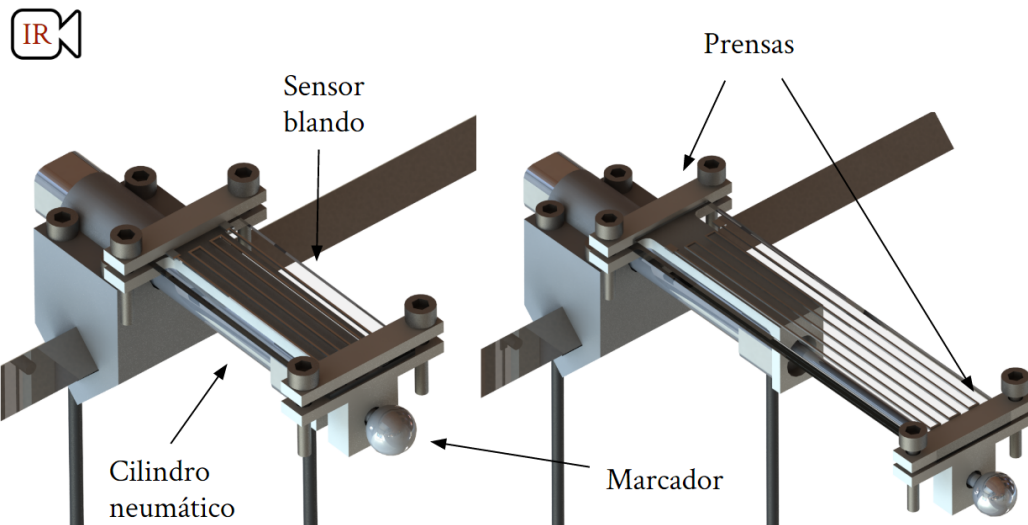
## Montaje

Se fijan los extremos del sensor a través de prensas impresas en 3D (Figura 4.7) sobre el cuerpo y pistón de un pequeño cilindro neumático de doble acción, el cual recibe presión desde un estanque a 4 bar. El cilindro se sujeta a la viga de acero de una prensa de escritorio utilizando una pieza impresa en 3D (en negro), y se conecta a una válvula de solenoide, la cual es controlada mediante un Arduino UNO. La señal del sensor se obtiene a través del circuito de amplificación utilizado anteriormente y es leída por el mismo Arduino UNO.

El pistón se desplaza hacia adelante y hacia atrás de acuerdo a una señal en escalón enviada por el Arduino. El desplazamiento del pistón se graba utilizando un dispositivo de seguimiento óptico (Optitrack<sup>II</sup>), el cual toma datos a 94 fps de la posición de un marcador plástico dispuesto en la punta del pistón, sincronizado con las mediciones de Arduino a través de una señal de disparo.

---

<sup>II</sup><http://optitrack.com/products/v120-trio/>



**Figura 4.7:** Esquema de montaje para ensayo de respuesta al impulso de sensor blando.

### Procedimiento experimental

1. Montar el sensor entre las prensas, cuidando que los canales del sensor no queden bajo estas.
2. Encender el compresor hasta tener 4 bares en el estanque.
3. Energizar el circuito de amplificación.
4. Iniciar la grabación.
5. Ejecutar el programa y esperar a que finalice.
6. Quitar la energía al circuito de amplificación.
7. Repetir 10 veces.

#### 4.3.4. Curva temperatura-resistencia de sensores

Los cambios de temperatura implican cambios en la geometría de los cuerpos, así como en sus propiedades físicas, como la resistencia eléctrica. Por lo anterior, un cambio de temperatura suficientemente elevado puede modificar la geometría del canal o la conductividad del metal líquido, afectando la resistencia del sensor y entonces la señal.

Si bien, la silicona que compone al robot es un elastómero (aislante, y sus propiedades varían poco respecto a la temperatura), la resistencia del sensor es pequeña, por lo que un pequeño cambio podría afectar los parámetros fijados en el sistema de control.

Dado que se plantea que el robot pueda moverse a través de tuberías, y estas en el área industrial trabajan a distintas temperaturas, es útil conocer el rango en que se puede desempeñar.

## Objetivo

- Registrar dependencia de resistencia en el sensor ante variaciones en la temperatura ambiental.

## Montaje

Se deposita el sensor dentro de un horno con control de temperatura. Los datos se registran midiendo la resistencia del sensor utilizando un multímetro y la temperatura superficial de este con un sensor de temperatura láser<sup>III</sup>.

## Procedimiento experimental

1. Ubicar el sensor dentro del horno.
2. Encender el horno y fijar temperatura máxima.
3. Esperar a que se establezca la temperatura en el horno.
4. Medir resistencia del sensor con multímetro y temperatura con sensor láser, apuntando directamente sobre él.
5. Repetir para otros valores.
6. Quitar energía al circuito.

### 4.3.5. Curva presión-deformación de actuadores

El rango de presión en el cual pueden trabajar los actuadores es fundamental para definir adecuadamente las componentes neumáticas del sistema, como compresores y válvulas. Conocer la relación de la presión con la deformación de los actuadores permitiría generar un controlador de lazo abierto, asociando un tamaño a un valor de presión.

De este ensayo se espera conocer la capacidad máxima de deformación de los actuadores, pues define el diámetro máximo de tubería en la cual se podría desplazar. La curva también permite analizar cómo se deforma el actuador y la efectividad del diseño para programar el comportamiento de la componente.

## Objetivo

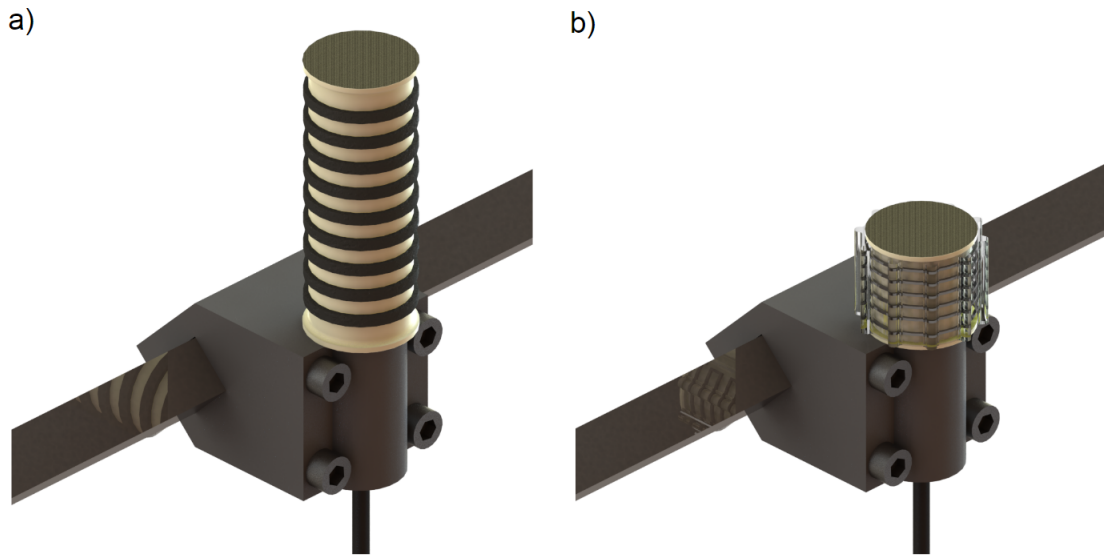
- Generar un gráfico que indique la relación de la presión interna en actuadores con la variación de sus dimensiones.

---

<sup>III</sup>Modelo: UT-3005A. <http://www.uni-trend.com/>

## Montaje

Se imprime una pieza en 3D que permite sujetar el actuador a través de su manguera. Esta pieza se fija en la viga de acero de una prensa de escritorio (Figura 4.8). La señal del sensor se mide de la misma forma que en los experimentos anteriores. La presión se controla con una válvula de alivio y se mide con un sensor de presión digital absoluto (Honeywell ASDX), cuyos datos adquiere un Arduino UNO. Las dimensiones del sensor se miden utilizando un pie de metro. Se adjunta esquema del circuito neumático en Anexo B.



**Figura 4.8:** Esquema de montaje para ensayo de curva presión deformación en actuadores. (a) Actuador axial montado (b) Actuador radial montado.

## Procedimiento experimental

1. Ubicar el actuador en el montaje.
2. Encender el circuito eléctrico.
3. Elegir una presión utilizando la válvula de alivio. La presión se observa en el monitor serial del Arduino en psi.
4. Tomar medidas de ancho y diámetro con el pie de metro.
5. Repetir para otras presiones.

### 4.3.6. Ensayos de contacto en tubos

La propuesta del robot diseñado se basa principalmente en ser capaz de diferenciar cuando hace contacto con la pared de de una cavidad. El actuador radial (con sensor blando acoplado) se dispone dentro de tubos y se registra la señal durante la expansión.

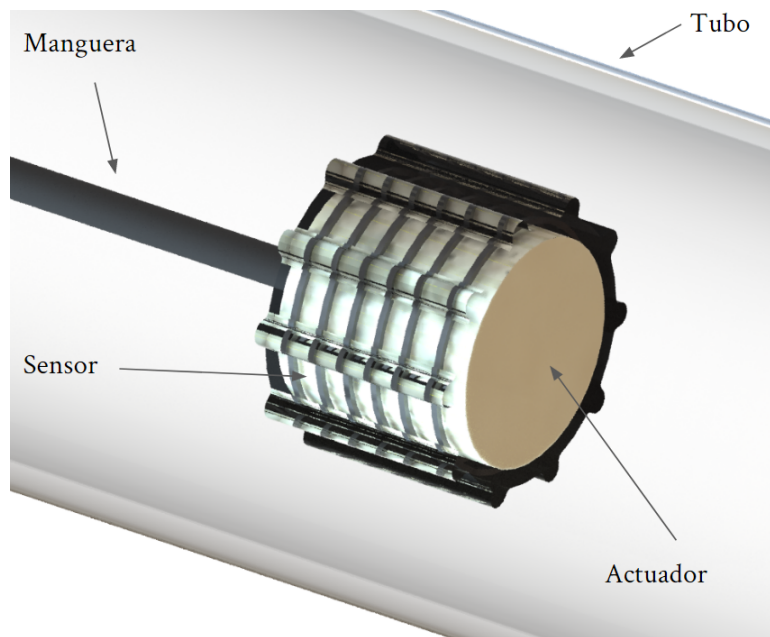
Se espera observar un comportamiento lineal durante la expansión libre y un alza en la señal tras el contacto, por efecto de las estrías. Este ensayo permite calibrar el circuito eléctrico para que entregue valores dentro del rango de medición del Arduino respecto al rango de deformación del sensor, como la ganancia o la configuración del puente de Wheatstone. También permite calibrar los parámetros de funcionamiento del programa.

## Objetivo

- Registrar la señal del sensor montado en el actuador mientras este se expande en una cavidad.

## Montaje

Se sitúa el actuador radial con una línea neumática dentro de un tubo de acrílico (Figura 4.9). La señal del sensor y la presión se adquieren de forma similar a los experimentos descritos anteriormente.



**Figura 4.9:** Esquema de montaje para ensayo de contacto en tubos.

El actuador se infla un tiempo fijado previamente mediante un pequeño compresor controlado por un Arduino UNO. Al terminar el ensayo el aire es expulsado automáticamente a través de una válvula de solenoide.

Se realiza un ensayo con y sin la banda estriada para demostrar que esta es necesaria. Posteriormente, se ubica el sensor en tubos de 32, 40 y 48 milímetros de diámetro interior.

## **Procedimiento experimental**

1. Situar el actuador radial, o bien, el robot completo, dentro de una cavidad definida.
2. Fijar el tiempo de inflado en el programa de Arduino.
3. Energizar el circuito de amplificación.
4. Ingresar un carácter al monitor serial del Arduino para iniciar la toma de datos.
5. Esperar a que el ensayo termine.
6. Repetir 10 veces.
7. Quitar la energía al circuito.

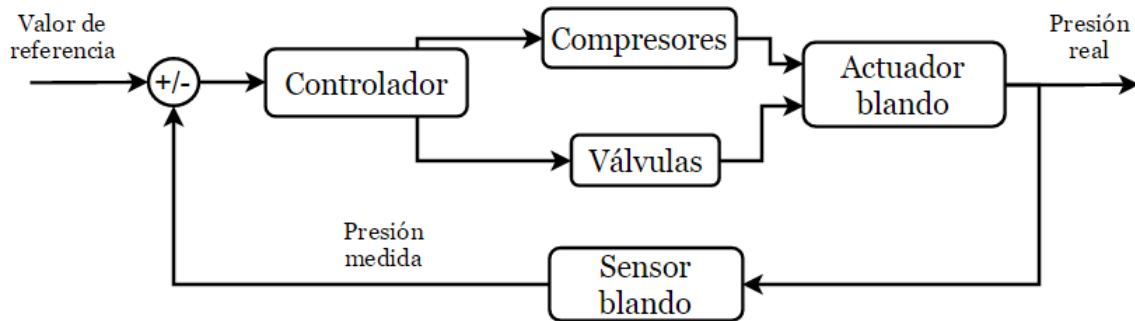


# Capítulo 5

## Sistema de control

### 5.1. Estrategia de control

Los sensores blandos dispuestos en actuadores radiales retroalimentan al sistema, generando un lazo cerrado, cuyo diagrama de bloque se observa en la Figura 5.1. Los actuadores del sistema corresponden al conjunto de válvulas y compresores, pues el robot es neumático, los cuales manipulan el estado de la planta, en este caso, las componentes del robot.



**Figura 5.1:** Diagrama de bloques para controlar un actuador blando. Si bien, la señal cambia en función de la deformación del sensor, esta es consecuencia de la presión que lo afecta.

Se utiliza entonces una lógica de estados para guiar el algoritmo del robot, de acuerdo a las fases exhibidas en la Figura 4.2 y en la Tabla 5.1, controlando la transición entre cada fase y el estado de cada componente en función de la señal de los sensores. Las componentes activas corresponden a compresores y válvulas, puesto que el gusano es neumático.

**Tabla 5.1:** Estado de componentes en cada fase del algoritmo de movimiento, con (1) inflado, (0) desinflado, (+) inflando y (-) desinflando.

Fase	1	2	3	4	5	6
A. Radial tras.	1	1	1	-	0	+
A. Axial	0	+	1	1	-	0
A. Radial front.	-	0	+	1	1	1

Las condiciones lógicas de transición corresponden a:

1.  $\rightarrow$  2: Actuador radial frontal finaliza desinflado.
2.  $\rightarrow$  3: Actuador axial finaliza extensión.
3.  $\rightarrow$  4: Contacto en actuador radial frontal.
4.  $\rightarrow$  5: Actuador radial trasero finaliza desinflado.
5.  $\rightarrow$  6: Actuador axial finaliza desinflado.
6.  $\rightarrow$  1: Contacto en actuador radial trasero.

Estas condiciones deben ser percibidas por el robot, y se modelan mediante ecuaciones que se integran al programa del controlador. El cambio de fase tras contacto con paredes ocurre entonces cuando la derivada de la señal aumenta hasta cierto punto, lo cual se expresa mediante la expresión lógica (5.1).

$$\text{Si } d(t_i, t_j) \geq \lambda \implies \text{Contacto} \quad (5.1)$$

Siendo  $d(t_i, t_j)$  la derivada promedio de la señal del sensor blando en la ventana de tiempo comprendida entre  $t_i$  y  $t_j$ . Es posible conocer cuando algún actuador finaliza de desinflarse de forma similar, puesto que al igualarse la presión interna con la del ambiente el actuador deja de cambiar su forma, por lo que la señal del sensor se vuelve constante, entonces, similar a cero. La condición se muestra en la expresión 5.2.

$$\text{Si } d(t_i, t_j) \approx 0 \implies \text{Fin de desinflado} \quad (5.2)$$

Cuando los actuadores radiales se encuentran anclados (estado 1 de acuerdo a Tabla 5.1), su señal debe ser también similar a cero. En caso que existan fugas, la derivada de la señal es negativa, lo cual se detecta y corrige mediante un control On/Off con histéresis de acuerdo a la ecuación 5.3, siendo  $c_r(t)$  el estado del compresor,  $e(t) = d(t_i, t_j) - 0$  la señal de error (0 es el set point, pues se espera que el actuador anclado esté estático) y  $\delta$  un valor a calibrar.

$$c_r(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } e(t) \leq -\delta \\ 0 & \text{si } e(t) \geq \delta \end{cases} \quad (5.3)$$

Dado que no se equipa al actuador axial con un sensor, las condiciones de transición son controladas por tiempo, como indican las expresiones en 5.4 y 5.5, siendo  $t_{fase}$  el tiempo que lleva ejecutandose una fase,  $t_{inf}$  y  $t_{dinf}$  los tiempos de inflado y desinflado respectivamente del actuador axial.

$$\text{Si } t_{fase} \geq t_{inf} \implies \text{Terminar de inflar} \quad (5.4)$$

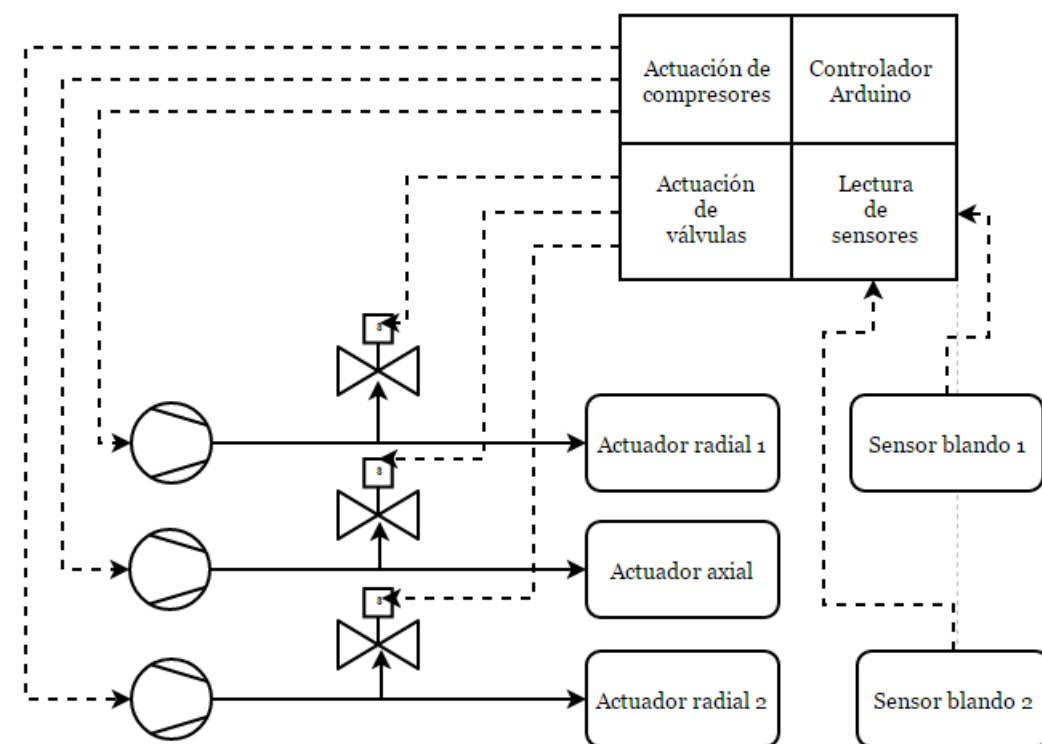
$$\text{Si } t_{fase} \geq t_{dinf} \implies \text{Terminar de desinflar} \quad (5.5)$$

La actuación de válvulas y compresores es On/Off, pues la primera es una componente binaria y no hay opción. Para los compresores, es preferente que trabajen siempre a máxima potencia, para darle más rapidez al movimiento, y el control On/Off es más simple de implementar.

Como controlador, se selecciona un Arduino Uno, principalmente por la simpleza del lenguaje de programación y la amplia cantidad de recursos de libre uso. Para controlar las componentes neumáticas y adquirir datos correctamente de los sensores se requiere un circuito electrónico.

## 5.2. Sistema neumático

Se diseña un sistema neumático considerando que el robot opera mediante aire comprimido, el diagrama de sistema se observa en la Figura 5.2. Se entregan enlaces a páginas de Internet respecto a la información técnica de las componentes utilizadas en el sistema en el Anexo A.

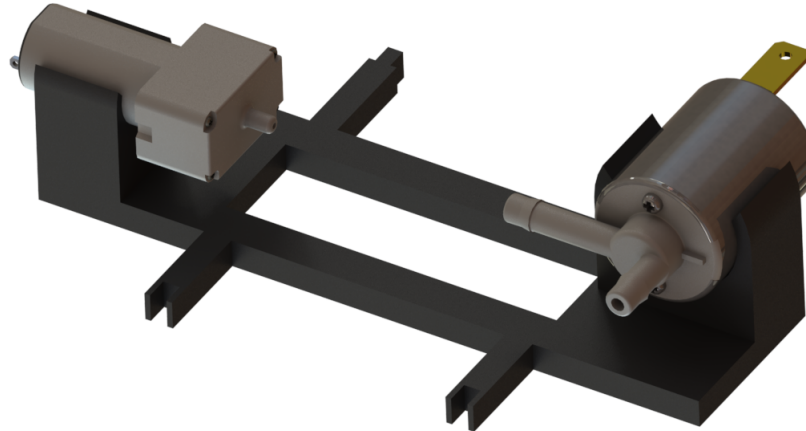


**Figura 5.2:** Diagrama del sistema de control para robot blando. En línea punteada las conexiones eléctricas y en línea completa las líneas neumáticas.

Las presiones de trabajo de los actuadores son relativamente bajas, (máximo 5 psi, según la caracterización) para un amplio rango de deformación. Se decide utilizar un pequeño compresor de diafragma modelo Koge KPM12A-3A para operar cada actuador del robot, y para purgar el aire, una válvula de solenoide de Conjoin Electronics modelo CJV23 (información

técnica en Anexo A). Las componentes se conectan entre si utilizando un conector de 3 entradas y mangueras de silicona de 5 mm de diámetro exterior.

Para facilitar el ensamble de componentes y la portabilidad del sistema, se diseña un panel para contener compresores y válvulas (Figura 5.3).



**Figura 5.3:** Sistema neumático. Módulo para sujetar válvula y compresor.

## 5.3. Circuito eléctrico

### 5.3.1. Propósito

El robot requiere de un circuito eléctrico, dado que consta de componentes que operan con potencia eléctrica (compresores y válvulas), la señal que se obtiene del sensor depende de su resistencia eléctrica y el controlador es digital. Las funciones requeridas son: entregar potencia a las componentes eléctricas y acondicionar la señal de los sensores.

### 5.3.2. Diseño de circuito

El circuito se dibuja utilizando el software Eagle 7.3.0, puesto que permite fabricar esquemáticos y planos de PCB. El diagrama del diseño final se observa en el Anexo B.

#### **Circuito amplificador**

Es necesario fabricar un circuito para obtener una señal medible por el Arduino desde los sensores blandos, puesto que la variación en resistencia es pequeña. Se decide utilizar un puente de Wheatstone, ya que permite detectar de forma precisa los cambios pequeños, se observa su ecuación en 5.6 y diagrama explicativo en la Figura 5.4.

De tal ecuación, la resistencia  $R_c$  debe ser lo más pequeña posible para aumentar el cambio ocasionado por la variación de  $R_x$ , evitando corrientes demasiado altas, pues calientan el circuito y aumentan el ruido. Los valores de  $R_b$  y  $R_a$  se eligen de tal forma que la señal sea levemente superior a 0 Volt con el sensor en estado natural, por el rango de medición del Arduino (valores entre 0 y 5 Volt).

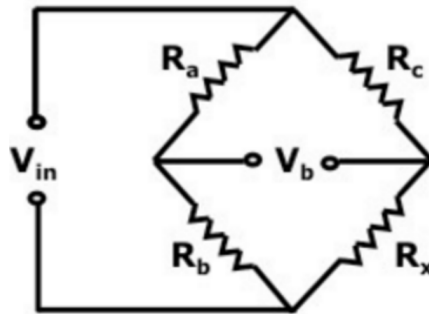
Para obtener valores referenciales, el diseño se guía con los siguientes supuestos y restricciones:

- $R_x$  se asume como  $0.45 \Omega$ , considerando la caracterización de los sensores (Capítulo 6).
- El voltaje de alimentación  $V_{in}$  como 5 Volt, para evitar la saturación del Arduino.
- La corriente no puede superar las unidades de mA.
- El voltaje de salida con el sensor en estado natural debe ser ligeramente mayor a cero. Se designa como  $V_{out}$ .
- Se toma un segundo valor de  $R_x$  que corresponde al sensor estirado un 100%, como  $1.5 \Omega$  (medido con multímetro y pie de metro). El voltaje de esta configuración se designa como  $V_{strain}$ .

Los resultados se observan en la Tabla 5.2, donde la corriente se calcula mediante la Ley de Ohm, siendo  $I$  la corriente,  $V$  el voltaje de entrada y  $R$  la resistencia equivalente del puente.

$$V_b = V_{in} \left( \frac{R_x}{R_x + R_c} - \frac{R_b}{R_b + R_a} \right) \quad (5.6)$$

$$I = \frac{V}{R} \quad (5.7)$$



**Figura 5.4:** Diagrama de un puente de Wheatstone <sup>1</sup>.

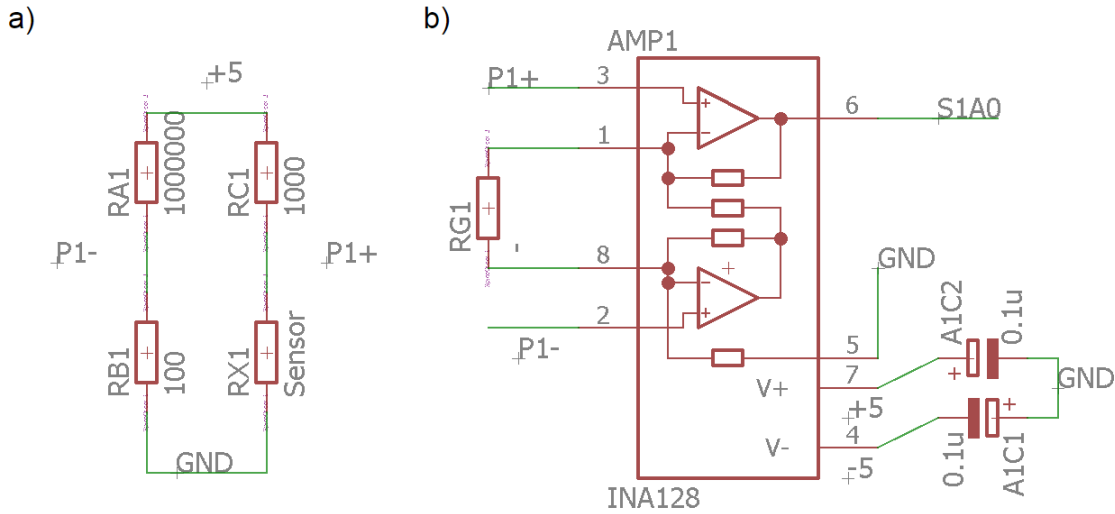
La variación de resistencia estirando el sensor al doble de su tamaño corresponde a cerca de 0.6 mV, lo cual es demasiado pequeño para ser adquirido con un Arduino (resolución de 8 bits). Se decide utilizar un amplificador instrumental INA128, con una ganancia de

<sup>1</sup><http://www.calculatoredge.com/>

**Tabla 5.2:** Cálculos para puente de Wheatstone.

$V_{in}$	5.0 V
$R_a$	1M $\Omega$
$R_b$	100 $\Omega$
$R_c$	1k $\Omega$
$V_{out}$	0.0012V
$V_{strain}$	0.007V
$I$	0.005mA

aproximadamente 500, de esta forma la salida varía teóricamente dentro del orden de unidades de Volt para un vasto rango de deformación (entre 0.6 y 3.5 Volt de 0 a 100 % de deformación). La ganancia se ajusta utilizando una resistencia  $R_G$ . La configuración del circuito se observa en el diagrama 5.5. La ganancia final es calibrada de acuerdo a las pruebas de funcionamiento.

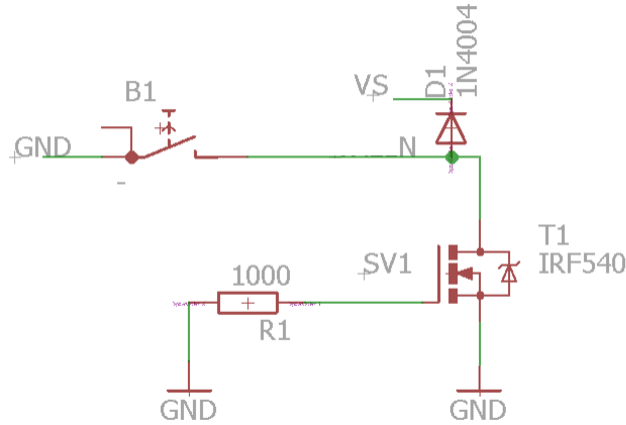


**Figura 5.5:** Circuito de amplificación. (a) Puente de Wheatstone, (b) Amplificador INA128.

### Circuito de potencia

El Arduino UNO no es capaz de entregar la corriente suficiente para compresores y válvulas, por lo anterior, se diseña un circuito de potencia. Se seleccionan transistores MOSFET modelo IRF540 para controlar la potencia en compresores y válvulas. Se ubican 3 transistores en dos grupos, siguiendo la configuración mostrada en la Figura 5.6, un grupo con  $V_s$  de 3 Volt para los compresores, y el otro con  $V_s$  de 12 Volt para solenoides.

Un terminal de cada componente va hacia el nodo fuente ( $V_s$ ) y el otro hacia el transistor ( $N$ ), el cual cierra la conexión a tierra cuando es activado. Para realizar pruebas de funcionamiento previo a la instalación en PCB, se decide agregar un botón a cada compresor y válvula para manipulación manual, entre el terminal negativo de las componentes y la tierra del circuito (se omiten en la PCB), como se observa en la Figura 5.6.



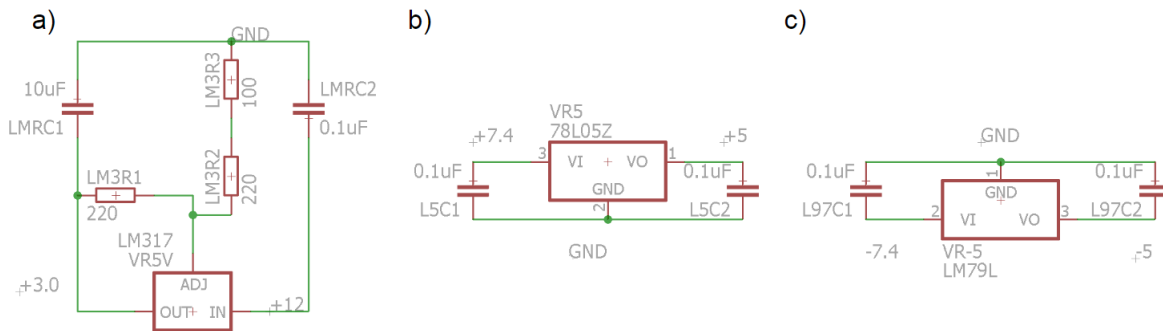
**Figura 5.6:** Circuito de potencia para componentes neumáticas.

### Alimentación

Dado que el mayor voltaje corresponde a 12 Volt y el consumo máximo de corriente a cerca de 2 Ampere (500 mA por compresor, 100 mA por válvula), se utiliza una fuente de computador. El circuito amplificador se alimenta utilizando una fuente bipolar formada por baterías LiPo de 2 celdas (7.4 Volt de salida). Dado que los valores superiores a 5 Volt no son medibles por un Arduino, se selecciona un par de reguladores de voltaje como indica la Figura 5.7. La salida de un WS78L05 produce los 5 Volt de alimentación positiva para los amplificadores y puentes, mientras que un LM79L la alimentación negativa.

Para producir los 3 Volt necesarios para compresores, se selecciona un regulador de voltaje LM317 implementado como indica la Figura 5.7. Se prefiere esto en lugar de modular los 12 Volt del transformador con PWM en transistores, puesto que es más seguro para los compresores. El voltaje de salida viene dado por la ecuación 5.8.

$$V_{out} = 1.25 \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) = 3.068V \quad (5.8)$$



**Figura 5.7:** Diagrama de circuito para reguladores de voltaje. a) LM317, b) WS78L05 y c) LM79L.

### 5.3.3. Diseño de PCB

Se considera una placa compuesta de material conductor de 0.1 mm de espesor en sus dos caras y aislante entre estas. Las componentes se ubican en la cara superior de la placa, y se utiliza la cara inferior completa como nodo tierra, facilitando el trazado de rutas entre componentes. Por restricciones del software, el tamaño de la placa no puede superar los 100 milímetros de ancho y largo. Se seleccionan bloques de conectores de terminal con tornillo. Las conexiones hacia la placa son 30 y corresponden a:

- 2 conectores para los terminales de la fuente de 12 V.
- 3 conectores para la fuente bipolar de baterías LiPo.
- 2 conectores para la salida de amplificadores hacia puertos análogos del Arduino.
- 4 conectores para los terminales de sensores blandos.
- 6 conectores para los terminales de compresores.
- 6 conectores para los terminales de válvulas.
- 6 conectores para la señal digital del Arduino hacia cada MOSFET.
- 1 conector para la tierra del Arduino.

Considerando la sugerencia de una calculadora online<sup>II</sup> de utilizar pistas de mínimo 0.718 milímetros, suponiendo el espesor de capa de 0.1 milímetros, corriente máxima de 2 Ampere e imponiendo un incremento máximo de diez grados Celsius a una temperatura ambiente de 25, se decide fabricar las pistas de 1 milímetro de espesor.

El esquema de la PCB se adjunta en el Anexo B.

## 5.4. Programa

### 5.4.1. Modelo

De acuerdo a la Figura 4.2 y a la Tabla 5.1, se genera el diagrama de estados de la Figura 5.8, el cual corresponde a la representación de un autómata finito determinista [23].

Se observan 6 fases principales (extensión y relajación de actuadores) más una fase de inicio, y 6 secundarias. Estas últimas corresponden al control on/off de los compresores de los actuadores radiales, los cuales compensan cuando el actuador radial está anclado cuando se detecta una fuga (flecha en rojo) y se apagan cuando se detecte suficiente presión (flecha en verde). El proceso es cíclico y continuo. El cambio entre fases principales sólo se da hacia la siguiente del ciclo y mediante una condición única detallada en el cuadro 5.3.

---

<sup>II</sup><http://circuitcalculator.com/>



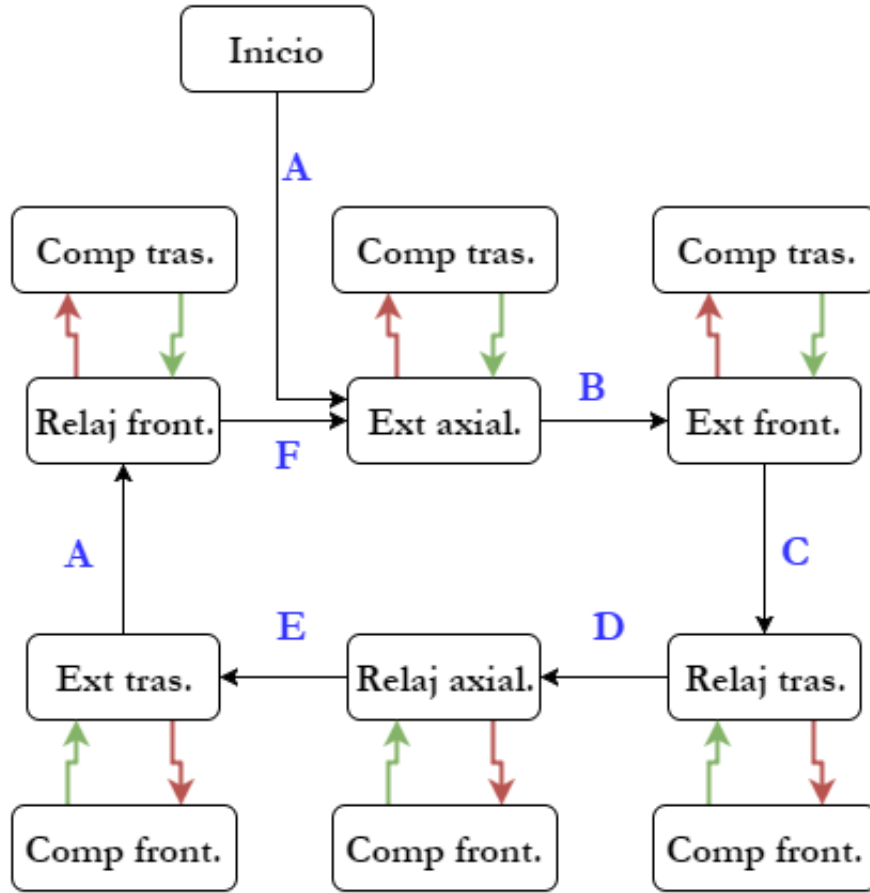


Figura 5.8: Diagrama de estados y transiciones.

Tabla 5.3: Condiciones de transición entre fases.

A	Contacto tras.	$d_{front}(t_i, t_j) \approx 0$
B	Extensión axial completa	$t_{fase} \geq t_{inf}$
C	Contacto front.	$d_{tras}(t_i, t_j) \geq \lambda$
D	Fin relajo tras.	$d_{tras}(t_i, t_j) \approx 0$
E	Relajo axial completo	$t_{fase} \geq t_{dinf}$
F	Contacto tras.	$d_{front}(t_i, t_j) \geq \lambda$

Dado el funcionamiento del robot, cada fase posee sólo una componente neumática actuando (compresor o válvula), a menos que se transite a las fases secundarias, donde se enciende un compresor más.

#### 5.4.2. Pseudocódigo

Se utiliza una variable que indica la fase del algoritmo, la cual entra en una estructura de control *switch* que asigna los procesos correspondientes en secuencia. Al ocurrir la condición de transición de cada instancia, la variable cambia y se entra a la siguiente fase, como indica el Algoritmo 1.

---

**Algoritmo 1** Control de fase de movimiento peristáltico

---

**seleccionar fase hacer**

**caso 1 hacer**  
| Relaj front.  
**fin**  
**caso 2 hacer**  
| Ext axial.  
**fin**  
**caso 3 hacer**  
| Ext front.  
**fin**  
**caso 4 hacer**  
| Relaj tras.  
**fin**  
**caso 5 hacer**  
| Relaj axial.  
**fin**  
**caso 6 hacer**  
| Ext tras.  
**fin**

**fin**

---

El control On/Off con histéresis (fase secundaria) para mantener componentes infladas se define mediante una declaración condicional (Algoritmo 2). Si se detecta que el actuador pierde presión bajo cierta tasa  $-\delta$ , el compresor se enciende, cuando el incremento de presión supera  $\delta$ , el compresor se apaga.

---

**Algoritmo 2** Control On/Off con histéresis para mantener actuadores radiales inflados.

---

**si**  $d(t_i, t_j) < -\delta$  **entonces**  
| Encender compresor  
**fin**  
**si**  $d(t_i, t_j) > \delta$  **entonces**  
| Apagar compresor  
**fin**

---

Las condiciones de transición en fases principales también se implementan mediante declaraciones condicionales de forma similar a la anterior. El compresor se mantiene encendido hasta que la pendiente de la señal del sensor supera el valor  $\lambda$  (Algoritmo 3), tras lo cual el compresor se apaga y se pasa a la siguiente fase. En el caso de la válvula, esta se mantiene abierta hasta que se detecta que no existe una tasa de cambio perceptible en la señal de deformación (Algoritmo 4), tras lo cual se cierra y se pasa a la siguiente fase.

---

**Algoritmo 3** Reconocimiento de contacto durante fase de extensión de actuadores radiales.

---

Encender compresor **si**  $d(t_i, t_j) > \lambda$  **entonces**  
| Apagar compresor, cambiar de fase  
**fin**

---

---

**Algoritmo 4** Reconocimiento de fin de desinflado durante fase de relajo de actuadores radiales.

---

Abrir válvula **si**  $d(t_i, t_j) < 0$  **entonces**  
| Cerrar válvula, cambiar de fase  
**fin**

---

El estado de las componentes neumáticas (válvula o compresor) del actuador axial no se controlan mediante la retroalimentación de un sensor blando, sino que mediante tiempos de operación, siendo  $t_i$  los tiempos programados y  $t_{fase}$  el tiempo que lleva ejecutándose la fase actual, como se ve en el Algoritmo 5.

---

**Algoritmo 5** Control de fases de actuador axial.

---

Activar componente **si**  $t_{fase} > t_0$  **entonces**  
| Desactivar componente, cambiar de fase  
**fin**

---

Los datos tomados se almacenan en un vector de tamaño 100 (dimensión arbitraria) para cada actuador radial. Notar que en el programa de Arduino los datos inician en la casilla 0, y por lo tanto, terminan en la casilla 99 para este vector. La función que ejecuta el muestreo (Algoritmo 6) elimina el dato más antiguo e incorpora el más reciente, los cuales corresponden a valores en mV entre 0 y 5 Volt. Se toma un dato y se actualiza el valor de la derivada promedio de cada sensor cada vez que el contador de tiempo supera el período de muestreo fijado.

---

**Algoritmo 6** Actualizar vector de datos.  $t_{ciclo}$  cuenta el tiempo entre cada adquisición de datos y  $t_{sample}$  es el período de muestreo.

---

**si**  $t_{ciclo} > t_{sample}$  **entonces**  
| **para**  $i = 0; i < 100; i ++$  **hacer**  
| |  $vectordatos[i]=vectordatos[i+1]$   $vectordatosfront[i]=vectordatosfront[i+1]$   
| **fin**  
|  $vectordatos[99]=readsens1$   $vectordatosfront[99]=readsens2$   $t_{ciclo}=0$  actualizar-  
| derivadas();  
**fin**

---

Se utiliza la derivada promedio como criterio para cambiar de fase, la cual se calcula de la forma indicada en la ecuación 5.9.

$$d = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} \quad (5.9)$$

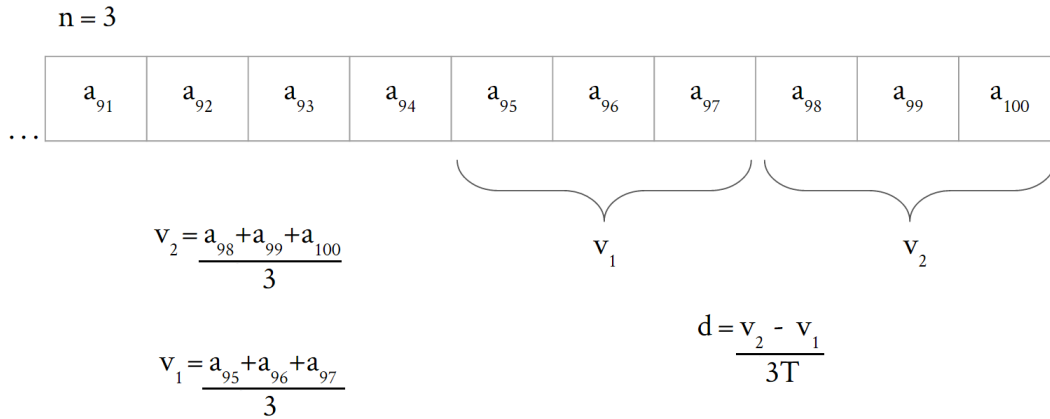
Siendo  $d$  la derivada promedio de la señal de un actuador, los valores  $v$  corresponden a valores promedio de la señal del sensor ( $v_1$  y  $v_2$  son valores de ventanas de datos consecutivas) y  $\Delta t$  al tiempo que dura una ventana (ecuaciones 5.10 y 5.11). El tamaño de la ventana se ajusta de acuerdo a un parámetro  $n$ . La ventana 2 se calcula sumando los últimos  $n$  datos del vector correspondiente y dividiendo por  $n$ , mientras que la ventana 1 hace lo mismo pero

con los penúltimos  $n$  datos del mismo vector, o bien, los  $n$  datos que preceden a la ventana 2 (como se indica en la Figura 5.9 para  $n = 3$ ).

$$v_1 = \frac{\sum_{i=100-n}^{100} a_i}{n} \quad (5.10)$$

$$v_2 = \frac{\sum_{i=100-2n}^{100-n} a_i}{n} \quad (5.11)$$

Siendo  $a_i$  un dato del sensor. El valor de  $\Delta t$  se calcula como la tasa de muestreo (sea  $T$ ) en milisegundos multiplicado por  $n$ , el valor de la derivada promedio se calcula en cada actualización de datos.



**Figura 5.9:** Ejemplo de cálculo de derivada, con  $n = 3$ .

La rutina que calcula el promedio de una ventana de datos de tamaño  $n$  (Algoritmo 7) debe realizar la sumatoria de ese intervalo, por lo que se implementa mediante un *for*. Los promedios de cada ventana se almacenan en variables globales.

---

**Algoritmo 7** Actualiza el valor promedio de cada ventana.

---

```

v1tras=0 v2tras=0 v1front=0 v2front=0 para  $i = 0; i < n; i ++$  hacer
| v1tras=v1tras+datatras[99-2*n+i+1] v2tras=v2tras+datatras[99-n+i+1]
| v1front=v1front+datafront[99-2*n+i+1] v2front=v2front+front[99-n+i+1]
fin
v1tras=float(v1tras/n) v2tras=float(v2tras/n) v1front=float(v1front/n)
v2front=float(v2front/n)

```

---

El cálculo de derivadas promedios utiliza la función anterior, actualizando los promedios, y almacenando los resultados en dos variables, como se muestra en el Algoritmo 8.

---

**Algoritmo 8** Actualiza el valor de las derivadas promedio de cada componente.

---

```

promedios() derivadapromtras=(v2tras-v1tras)/(ntsample) derivadapromfront=(v2front-
v1front)/(ntsample)

```

---

### 5.4.3. Estructura

Un programa de Arduino siempre posee dos funciones principales, *setup* y *loop*. En la primera, se configura el funcionamiento de la placa, como declarar los terminales a utilizar y la función que cumplirán (entrada o salida), mientras que en la segunda se escriben instrucciones que se ejecutan continuamente, mientras la placa se encuentre energizada. Fuera de estas funciones, es posible definir otras nuevas, generar variables globales, importar librerías y otros.

Existen parámetros que controlan el funcionamiento del programa, los cuales corresponden a:

- Set point para detectar contacto en cada actuador radial.
- Set point para detectar fin de desinflado en cada actuador radial.
- Tiempos de inflado y desinflado de actuador axial.
- Nivel de histéresis para compensar fugas en actuadores radiales.
- Tasa de muestreo.
- Tamaño de las ventanas de datos a analizar.

Estas variables se declaran al inicio del programa, antes del *setup*, para facilitar su calibración en cada iteración tras las pruebas de desplazamiento. La calibración busca minimizar el tiempo de cada fase (excepto extensión del actuador axial), aumentando la velocidad del robot y asegurando un buen funcionamiento en todas las condiciones que se pone a prueba.

El funcionamiento del robot se divide en 3 tareas: actuar componentes de acuerdo a la fase, tomar datos de los sensores y decidir cuando cambiar de fase. Estas 3 tareas se escriben como funciones y se llaman dentro del *loop* (Algoritmo 9). Para facilitar la operación del robot, el programa se iniciará cuando reciba la señal digital de un botón.

---

**Algoritmo 9** Rutina principal del robot.

---

```
(dentro del loop) si señalinicio==true entonces  
| mientras true hacer  
| | controldefase() actualizarsensores() ejecutaractuadores() si señalemergencia==true  
| | entonces  
| | | emergencia()  
| | fin  
| fin  
en otro caso  
| actualizarsensores()  
fin
```

---

Se incluye también una rutina de emergencia que apaga todos los compresores, abre las válvulas y reinicia el programa, activada mediante un pulsador. Los datos se empiezan a

registrar antes del inicio del movimiento, pues de esta forma los vectores de datos no inician con valores cero que puedan afectar la ejecución del algoritmo.

La función de ejecutar actuadores es simplemente utilizar el comando de Arduino para enviar una señal a cada actuador desde un terminal digital según el estado que asignado por cada fase.

En el *setup* se declaran 2 terminales analógicos como entradas para los sensores, 6 digitales como salidas hacia los transistores y 2 digitales como entradas para los botones de inicio y emergencia.

Las funciones generadas y el programa final de control se observan en el Anexo C.

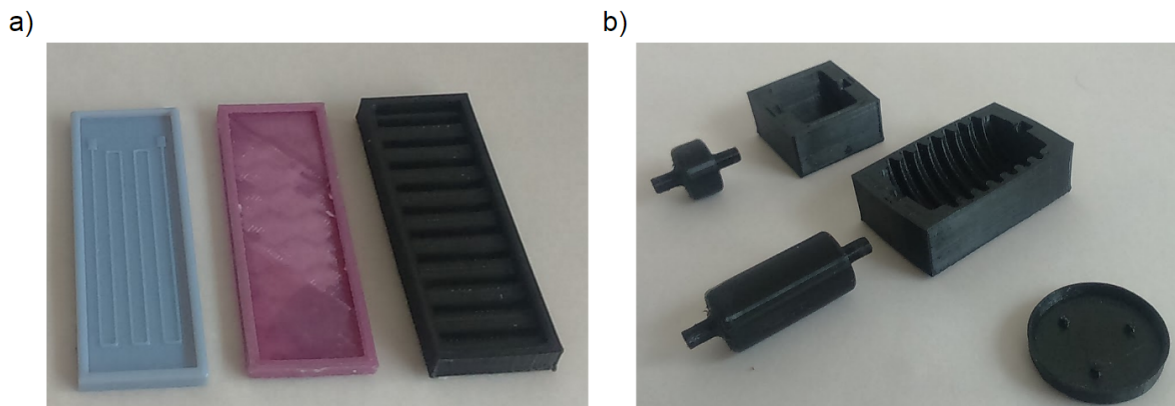
## Capítulo 6

# Resultados y discusión de fabricación, implementación y ensayos

### 6.1. Fabricación

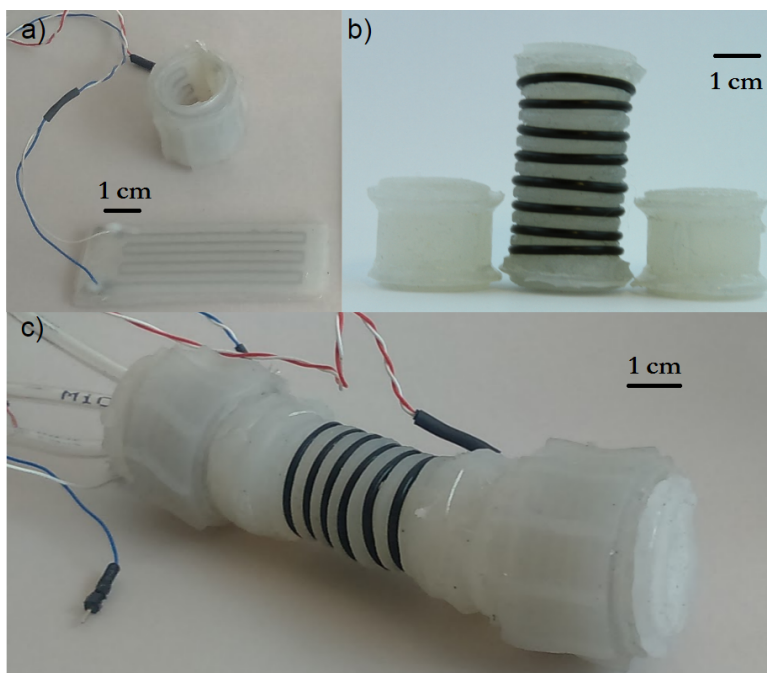
Se obtienen moldes impresos en 3D (Figura 6.1) para fabricar sensores y actuadores, según el proceso indicado en la Figura 4.5.

Se fabrican 6 actuadores axiales, 12 radiales y 6 sensores. Aproximadamente, cada proceso de moldaje toma 15 minutos para la preparación de los implementos y 30 de curado en el horno, por lo que es factible fabricar el robot completo en una jornada de 9 horas. La Figura 6.2 muestra las componentes manufacturadas en (a) y (b), el robot ensamblado en (c).



**Figura 6.1:** Modelo 3D de moldes para componentes. (a) Moldes para sensores, respectivamente de izquierda a derecha, molde para canales, lámina plana y lámina estriada. (b) Moldes para actuadores.

Cuando un actuador pasa a la etapa de adhesión de tapas, es posible utilizar los moldes del manto para fabricar otros en paralelo, aumentando la producción. Lo mismo ocurre con los sensores, pues los moldes quedan disponibles luego de pasar a la etapa de llenado de canales.



**Figura 6.2:** Actuadores fabricados y robot ensamblado. (a) Sensor blando abajo y sensor blando con banda estriada montada arriba (b) Set de actuadores (c) Robot ensamblado.

Para disminuir el tiempo y etapas en la manufactura del robot, se propone el diseño de moldes y procedimiento exhibido en el Anexo B, el cual se trata de un molde de inyección. En este, la cavidad cilíndrica de silicona se produce en un sólo proceso, reduciendo el tiempo de manufactura y eliminando las uniones en la pieza de silicona, haciéndola más resistente a la fatiga.

Los actuadores fabricados rara vez presentan fugas al momento de ser probados, las cuales surgen de defectos que se forman generalmente en el pegado de tapas, por causa de alguna burbuja en la capa de silicona fresca que actúa como adhesivo. Esto puede ser debido a que el actuador se deposita sobre la capa, atrapando aire entre la silicona fresca y la curada, o bien, en el caso que se esté pegando la segunda tapa, el aire al interior del actuador se expande durante el período dentro del horno, intentando escapar por la sección que se está pegando.

Al inflar los actuadores para comprobar el sellado, se observan grietas dispuestas de forma regular en el manto. Estas grietas son ocasionadas por las capas sucesivas del proceso de manufactura aditiva por el cual se obtienen los moldes, de baja calidad superficial. Estas grietas crecen en cada ciclo y disminuyen la vida del componente, fallando por fatiga prematuramente.

Una solución a esto es el cambio del proceso de manufactura, como utilizar la tecnología impresión 3D de fotopolímero, que tiene una mejor calidad superficial. Otra alternativa es la aplicación de un producto abrasivo sobre la superficie interna del molde, o bien, que genere una capa extra encima.

El principal problema durante la fabricación del robot es la incorporación de las mangueras, puesto que la facilidad con la que penetran a la silicona depende del entramado del sector de fibra de vidrio que deben atravesar, muchas veces requiriendo excesiva fuerza, cortando demasiado en el proceso y generando fugas. Este problema se da particularmente en el actuador



trasero, puesto que cuenta con 5 orificios en su estructura, y el diámetro de la manguera no es despreciable respecto al tamaño del robot.

La rigidez de la manguera también afecta la implementación del robot, puesto que si las espiras no se ubican adecuadamente, deforman a los actuadores o a los orificios donde se conectan las líneas neumáticas. Utilizar mangueras de menor diámetro genera más resistencia al flujo de aire, y si la rigidez es muy pequeña, la misma silicona del actuador la estrangula.

La fabricación de los sensores puede ser mejorada y automatizada a un sólo proceso de impresión 3D, mediante impresión 3D embebida. De esta forma, se lograrían geometrías más finas y complejas, reduciendo la variación por efecto de la habilidad humana dentro del proceso de fabricación, además de eliminar la necesidad de moldes y el tiempo que conlleva.

El conjunto del sensor con la banda estriada tiene un espesor de 8 milímetros, lo cual no es menor considerando el espesor de 3 milímetros de los actuadores radiales, aumentando la resistencia a la deformación del ensamble. Es posible reemplazar la lámina plana que sella los canales del sensor por el lado plano de la banda estriada, quitando resistencia al conjunto.

El diseño de los sensores facilita su incorporación o remoción del robot en caso que falle el sensor mismo o el actuador en el que se ubica. La presión con que se aferra al actuador es suficiente para no ser desplazada por fuerzas menores, como durante la manipulación del robot o caídas.

En caso que falle un actuador, este puede ser reemplazado cortando la silicona que lo une al resto y repitiendo el proceso de incorporación de mangueras, evitando la fabricación del set completo de actuadores.

La silicona utilizada tiene un precio de 30 dólares los 850 ml<sup>1</sup>, el volumen utilizado en la fabricación de actuadores y sensores es cercano a 60 ml, luego el costo en silicona del robot es aproximadamente 2.1 dólares (sin considerar gastos de envío).

El precio de 100 gramos de metal líquido es de aproximadamente 100 dólares, considerando una densidad de 6.4 gramos por ml, el precio por ml es de 6.4 dólares. Cada sensor utiliza 0.2 ml del metal, por lo que se estima un costo total de 2.6 dólares de este material por robot.

Despreciando el costo de los cables eléctricos y dado un precio de 80 pesos por o'ring, el costo total en material del robot es de 3630 pesos chilenos (sin considerar gastos de envío).

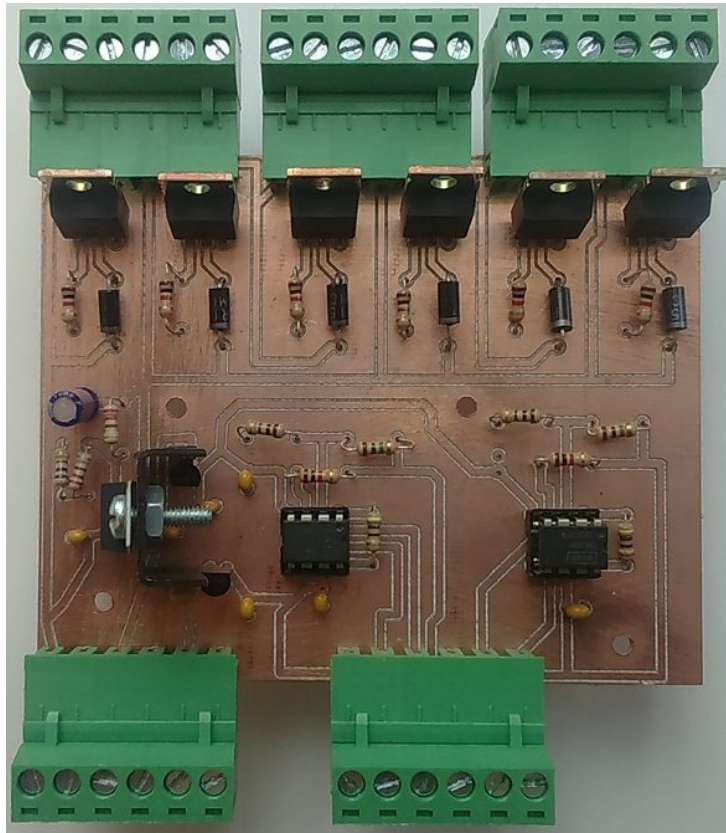
Se fabrica la PCB (Figura 6.3) que corresponde al diseño de circuito eléctrico propuesto. Se observa que el uso del espacio de la placa no es eficiente, pero esto no es relevante para el trabajo.

El panel de componentes neumáticas se imprime en 3D (Figura 6.4) y permite el ensamble con estas a través de ajuste a presión, lo que facilita la implementación. Similar a la PCB, el espacio que ocupa el panel no se utiliza eficientemente, pues poner una componente sobre otra habría reducido la superficie del subsistema, no obstante, esto no afecta el funcionamiento del sistema.

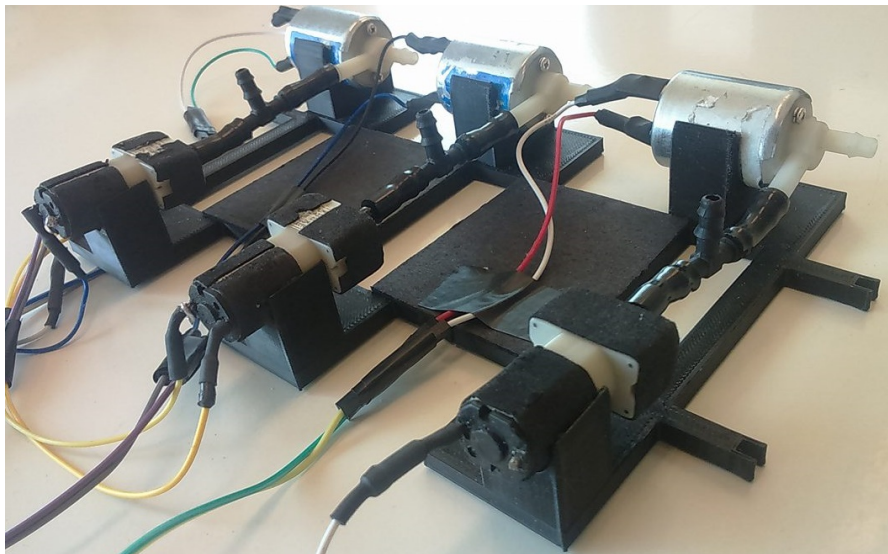
---

<sup>1</sup><http://www.reynoldsam.com/product/ecoflex/>

<sup>1</sup><https://es.aliexpress.com/item/Galinstan>

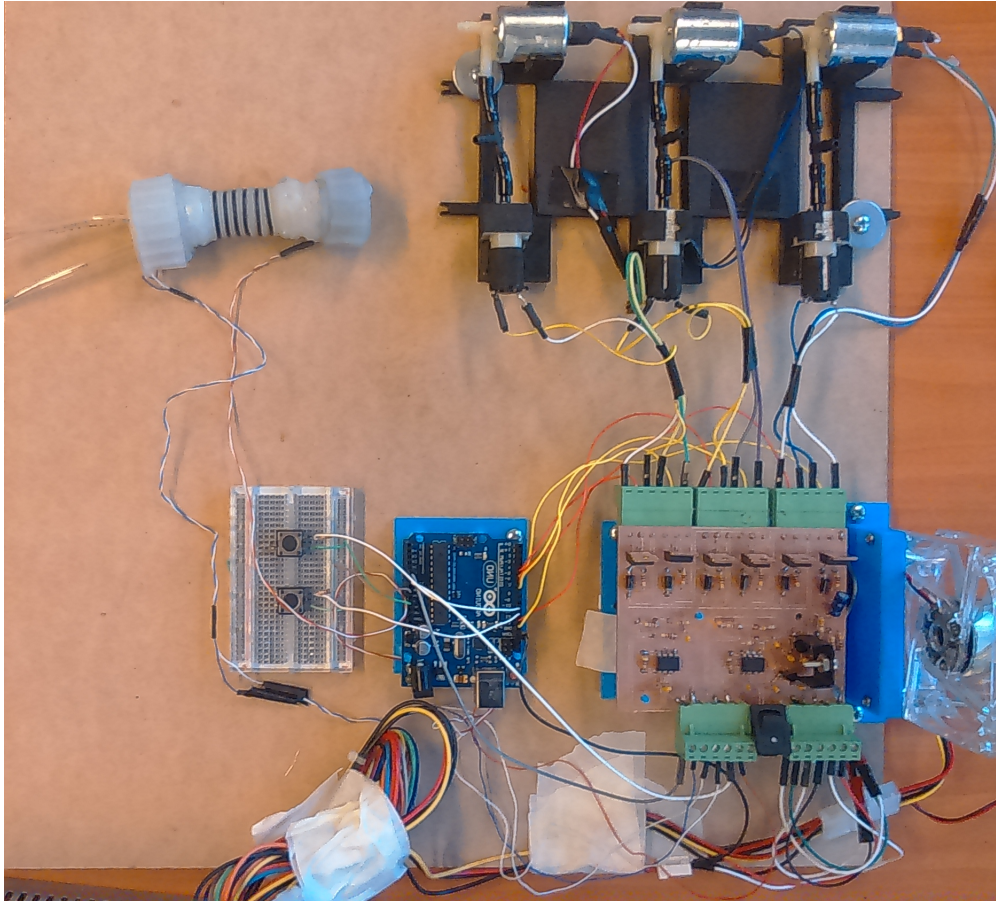


**Figura 6.3:** PCB fabricada.



**Figura 6.4:** Panel de compresores y válvulas.

Se imprimen componentes en 3D para facilitar la unión de los subsistemas en un tablero (Figura 6.5), de esta forma se facilita el traslado y operación del robot.



**Figura 6.5:** Sistema completo implementado. Se diseñan e imprimen soportes para la electrónica.

## 6.2. Caracterización

De la Tabla 6.1 se observa que las dimensiones obtenidas son muy similares a las impuestas durante el diseño, el error puede ser causa de imprecisión en la fabricación de los moldes, o excesos con la silicona durante las fases de pegado. Los moldes de los sensores en particular no poseen una estructura que limite la cantidad de silicona dentro de ellos, como una tapa, por lo que su espesor suele variar. La Tabla 6.2 permite llegar a conclusiones similares para el caso de los actuadores. El robot final mide 93 milímetros de largo.

De acuerdo a la Tabla 6.3, se puede decir que el proceso de fabricación de sensores es bueno (la desviación estándar es pequeña y los valores extremos son cercanos), a pesar de depender en gran parte de habilidad humana. La fase más crítica del proceso corresponde al pegado de la lámina plana que cierra los canales, puesto que se debe formar una capa de silicona fresca muy delgada y depositar la lámina con canales sobre la plana cuidadosamente, de otra forma la silicona fresca se introduce en los canales, bloqueándolos.

Se observa que la resistencia promedio es mayor a la teórica, lo cual puede ser causa de múltiples factores: los canales no se llenaron completamente de metal líquido, la geometría de los canales no es fiel al diseño por la precisión en la fabricación de los moldes (canales más pequeños) o defectos en el proceso de moldaje (espacios no pegados entre capas, partículas

de suciedad o burbujas), entre otras. Esta diferencia no tiene mayor impacto dentro de la electrónica del sistema.

**Tabla 6.1:** Dimensiones principales de sensores blandos, medidas promedio, en milímetros.

Largo	63.5
Ancho	23
Espesor	4.2

**Tabla 6.2:** Dimensiones principales medidas de actuadores de robot gusano, medidas promedio, en milímetros.

Dimensión	A. axial	A. radial
Diámetro	21.16	19.7
Diámetro en tapas	24	24.2
Largo	40.22	20
Espesor en manto	3.3	3.4
Espesor en tapas	6	6.5

**Tabla 6.3:** Resistencia eléctrica de sensor blando, valores en  $\Omega$ . Datos medidos en 6 sensores fabricados.

Teórica	0.35
Promedio	0.45
Desviación estándar	0.05
Mínimo	0.4
Máximo	0.5

La resistencia de los sensores (Tabla 6.3) es relativamente pequeña, por lo que no es recomendable restar importancia al tipo de conector a utilizar en los terminales del sensor, ni a la forma en que se conecta a un circuito, puesto que las resistencias de contacto inducirían un error notable en el sistema.

La Tabla 6.4 indica que la resistencia del sensor varía relativamente poco en un amplio rango de temperatura. El ensayo se realiza solamente una vez (además de la medición a temperatura ambiente), fijando una temperatura segura para que el recubrimiento plástico de los conectores del sensor no se quemé. El sensor demoró aproximadamente quince minutos en entregar un valor estable de resistencia, mientras que el horno alcanzó la temperatura máxima en dos minutos. La demora en el sensor es consecuencia de que la silicona utilizada es un material aislante, y resiste el paso del calor hacia el metal líquido.

**Tabla 6.4:** Variación de resistencia eléctrica de sensor blando respecto a temperatura.

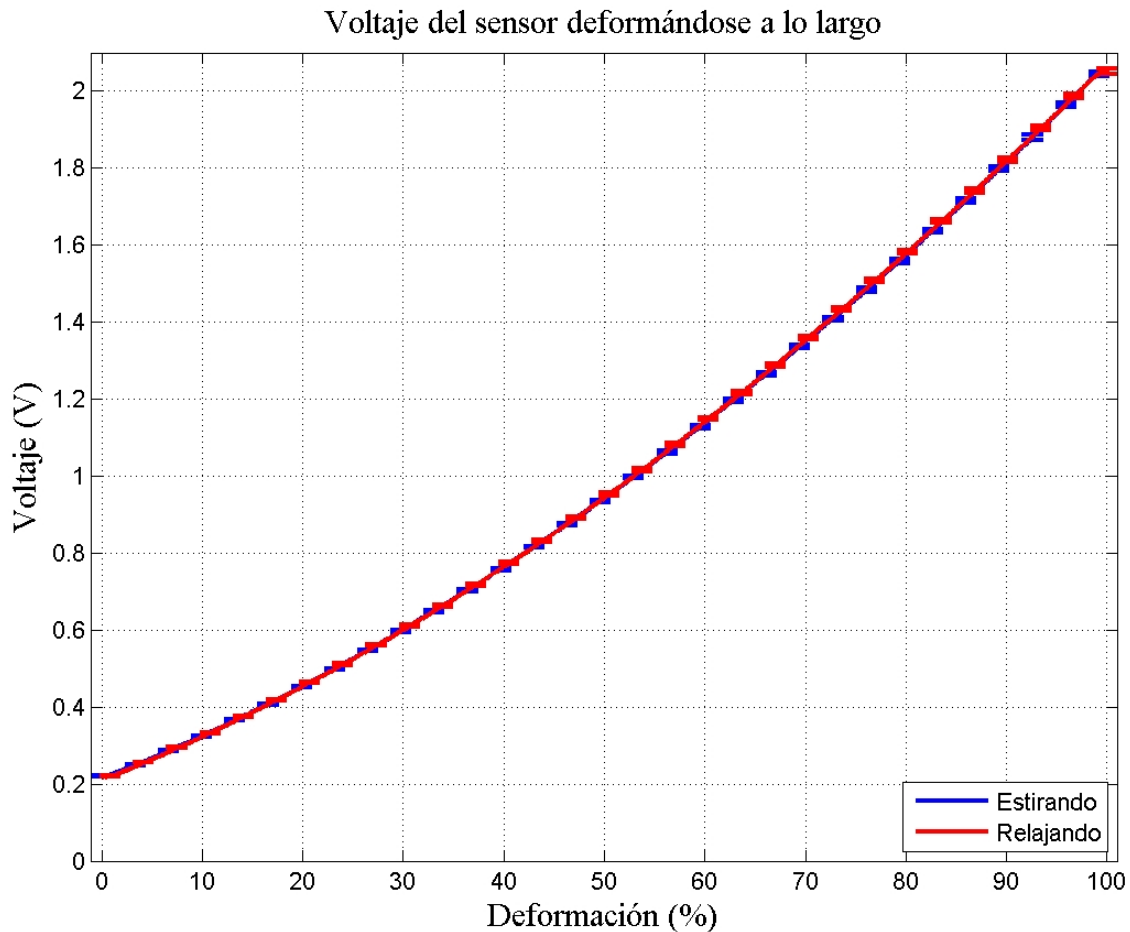
Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Resistencia [ $\Omega$ ]
23	1.65
110	1.75

Si la temperatura del ambiente en el cual el robot se desplaza aumenta, el controlador no se vería notablemente afectado si se expone un par de minutos. Para tiempos mayores, induciría un error de una décima de  $\Omega$ , lo cual produciría un error de 10% en el cálculo de la deformación según el modelo lineal que se propone para el sensor (explicado en párrafos siguientes). Si bien, un 10% de error puede no ser despreciable, no perjudica al controlador, puesto que mide la variación de la resistencia y no directamente a esta.

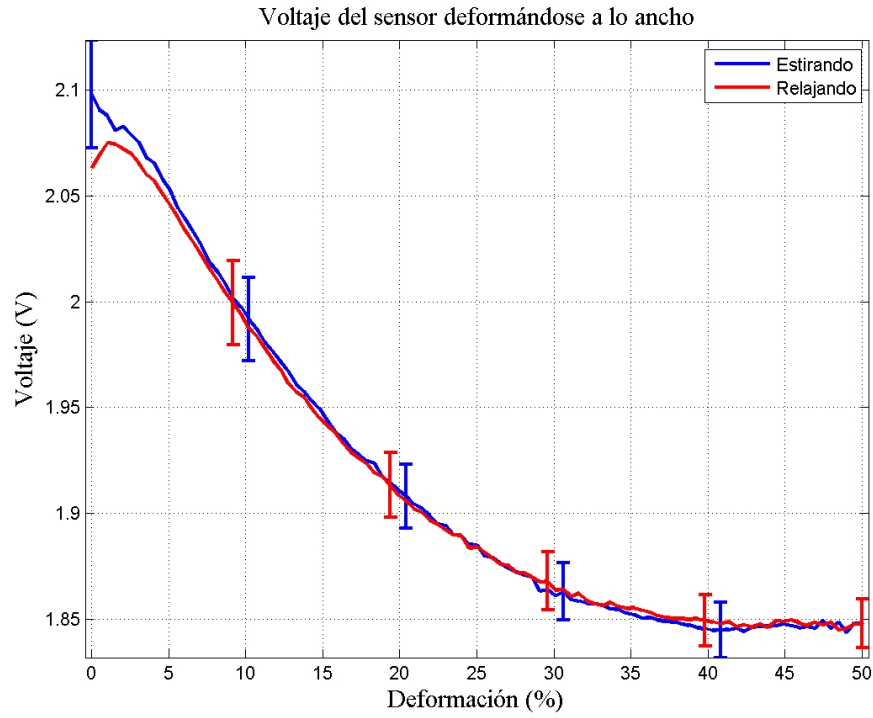
De acuerdo a la Figura 6.6, la señal de estiramiento a lo largo tiene una marcada tendencia lineal en el rango de deformación, no presenta histéresis y la variación de la señal en cada toma de datos es mínima, indicando que posee gran repetitibilidad. Posteriormente, un sensor con los canales vacíos se estira hasta fallar, lo cual ocurre cerca de los 30 centímetros de largo.

De la Figura 6.7 se observa que el sensor blando muestra claramente una mayor sensibilidad a la deformación a lo largo que a lo ancho. Esta última es despreciable considerando la pequeña variación experimentada, incluso con ganancia 10 veces mayor.

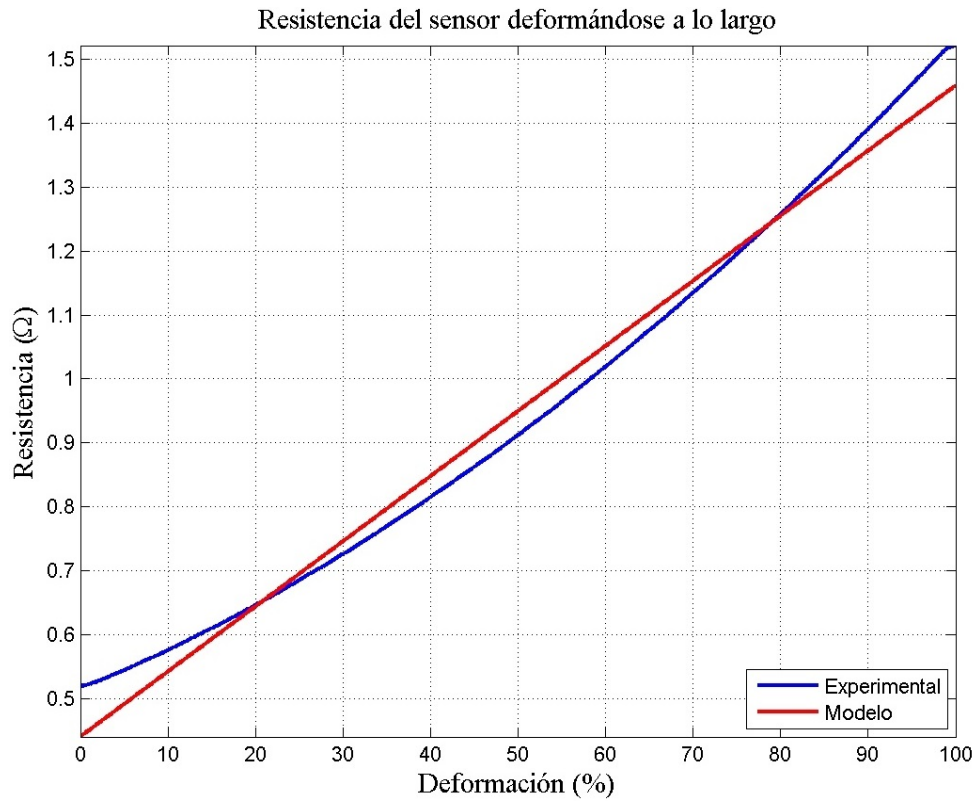
Se genera un modelo del cambio de resistencia en función de la deformación a lo largo para el sensor blando mediante una regresión lineal. Utilizando los datos de la Figura 6.6 divididos por la ganancia utilizada ( $G = 51$ ), se aplica la ecuación 5.6 despejando  $R_x$  y se resta la resistencia de los cables utilizados, lo cual entrega la curva experimental de la Figura 6.8. La curva del modelo posee un  $R^2$  de 0.987, indicando que los parámetros de un modelo lineal permiten realizar una buena estimación del fenómeno.



**Figura 6.6:** Resultados de ensayo de estiramiento sobre sensor blando. Deformación a lo largo, la señal del sensor se amplifica con  $G = 51$ .



**Figura 6.7:** Resultados de ensayo de estiramiento sobre sensor blando. Deformación a lo ancho, la señal del sensor se amplifica con  $G = 501$ .

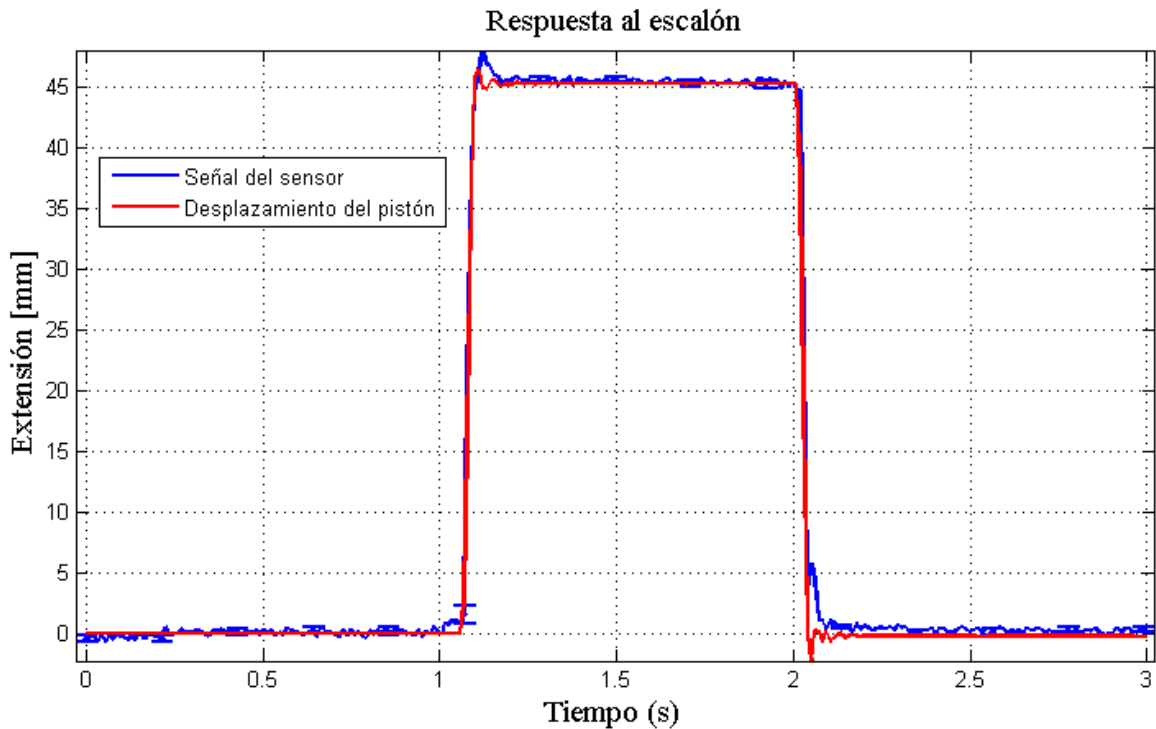


**Figura 6.8:** Cambio de resistencia en función del largo. Ecuación:  $R = 0.01e + 0.44$ , siendo  $R$  la resistencia en  $\Omega$  y  $e = 100 \frac{\Delta L}{L}$ . Coeficiente de determinación, 0.987.

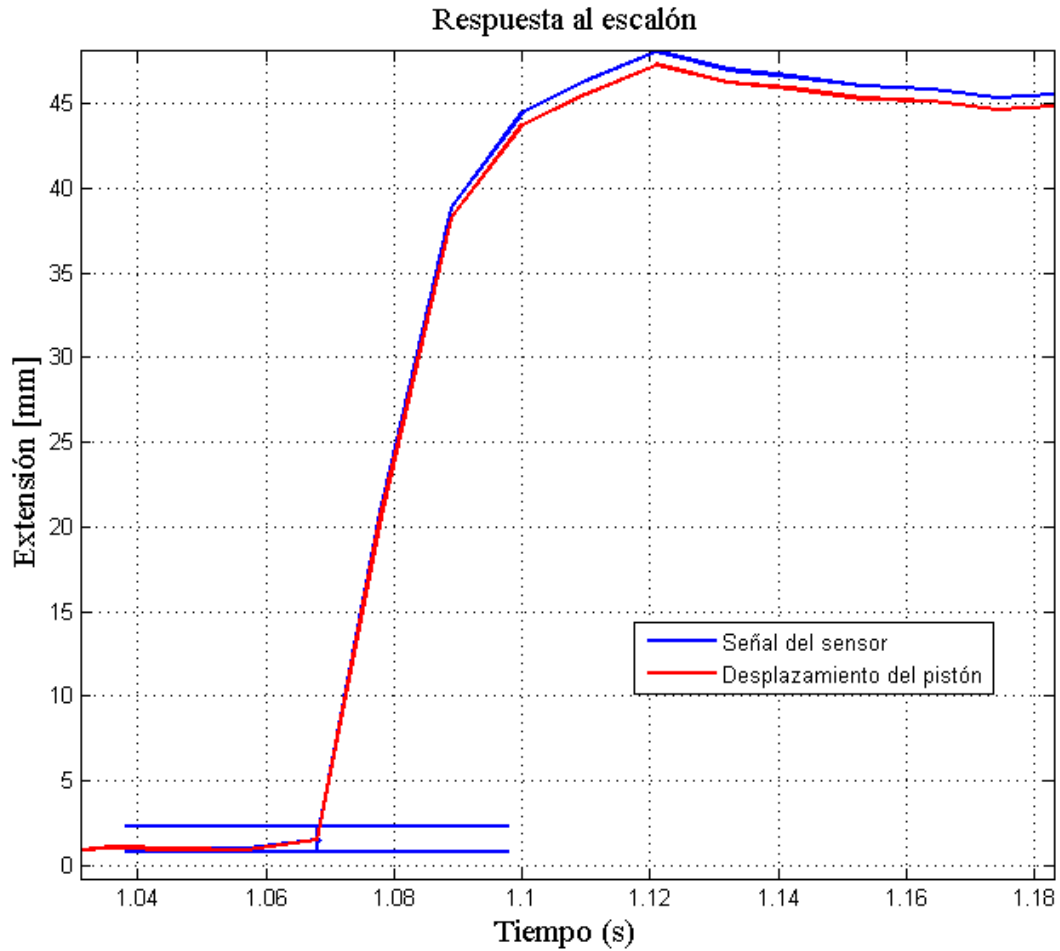
El ensayo de respuesta al escalón (Figura 6.9) indica que el sensor tiene un tiempo de respuesta relativamente rápido, considerando que es capaz de seguir el desplazamiento del pistón de forma casi idéntica la mayor parte del proceso, acción que toma aproximadamente cinco centésimas de segundo en ocurrir (Figura 6.10).

La señal del sensor se ve ruidosa a pesar de ser un promedio de 10 ejecuciones del experimento, debido a que se adquiere sin filtrar por el Arduino, evitando añadir tiempo a su respuesta. Se observa un peak tras alcanzar la extensión máxima, esto es por efecto de la inercia, tanto el sensor como el marcador anexado al pistón continúan deformándose por la fuerza del proceso.

El montaje utilizado no permitiría una adquisición efectiva de un escalón más rápido, puesto que se registran aproximadamente 94 datos por segundo, y el tope del sistema de cámaras es 120. El estímulo que da la extensión del cilindro no alcanza a ser suficientemente rápida para ser considerada un escalón, relativo a la respuesta del sensor.



**Figura 6.9:** Resultados de ensayo de respuesta al escalón de sensor blando.

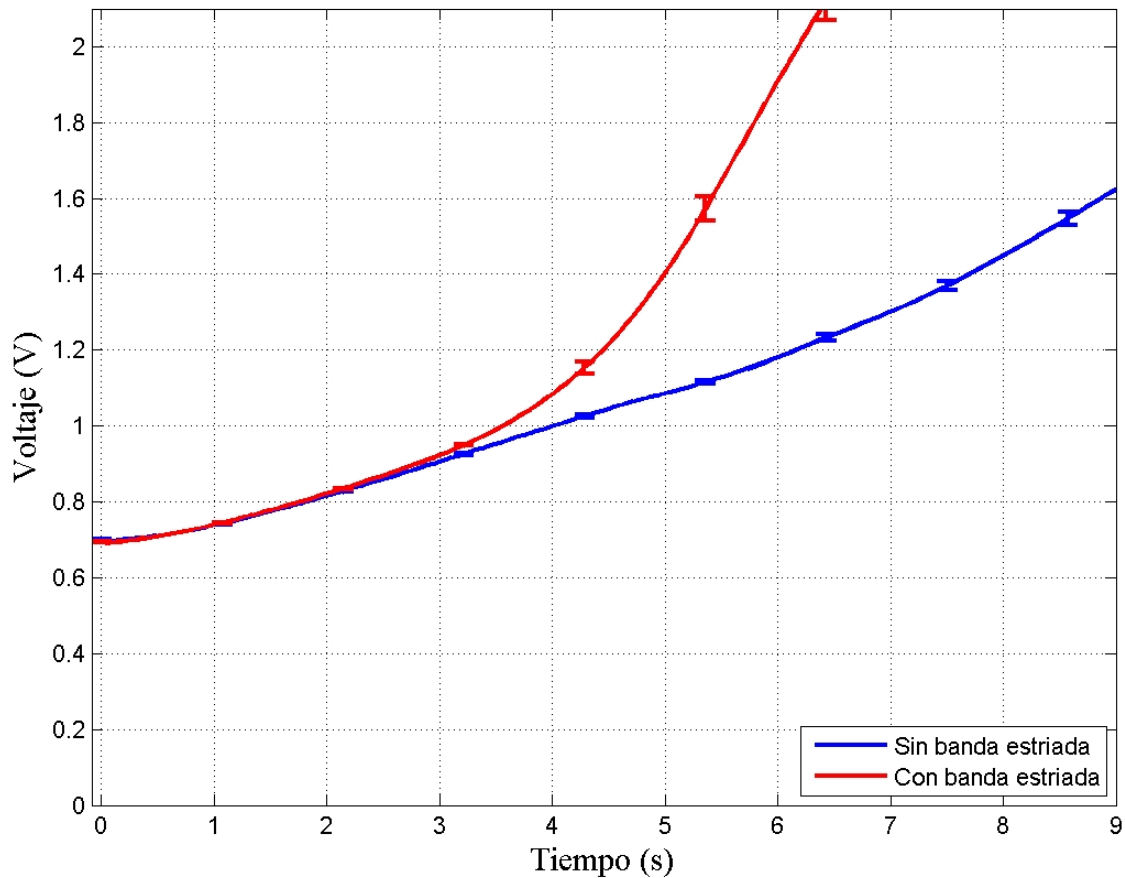


**Figura 6.10:** Acercamiento de resultados de ensayo de respuesta al escalón de sensor blando.

Mediante la Figura 6.11 se demuestra que la banda estriada es necesaria dentro del sistema para que el contacto sea perceptible, puesto que se observa un cambio notable cuando se utiliza respecto a cuando no. La forma de la señal tras el contacto no es lineal, la pendiente probablemente va en aumento puesto que el la periferia del actuador cubre progresivamente la cavidad dentro de la cual se extiende, presionando más estrías.



Voltaje del sensor durante expansión de actuador radial dentro de un tubo de 48 mm de diámetro interior



**Figura 6.11:** Señal del sensor blando montado en actuador radial inflándose dentro un tubo de 48 mm de diámetro interior, con y sin banda estriada.

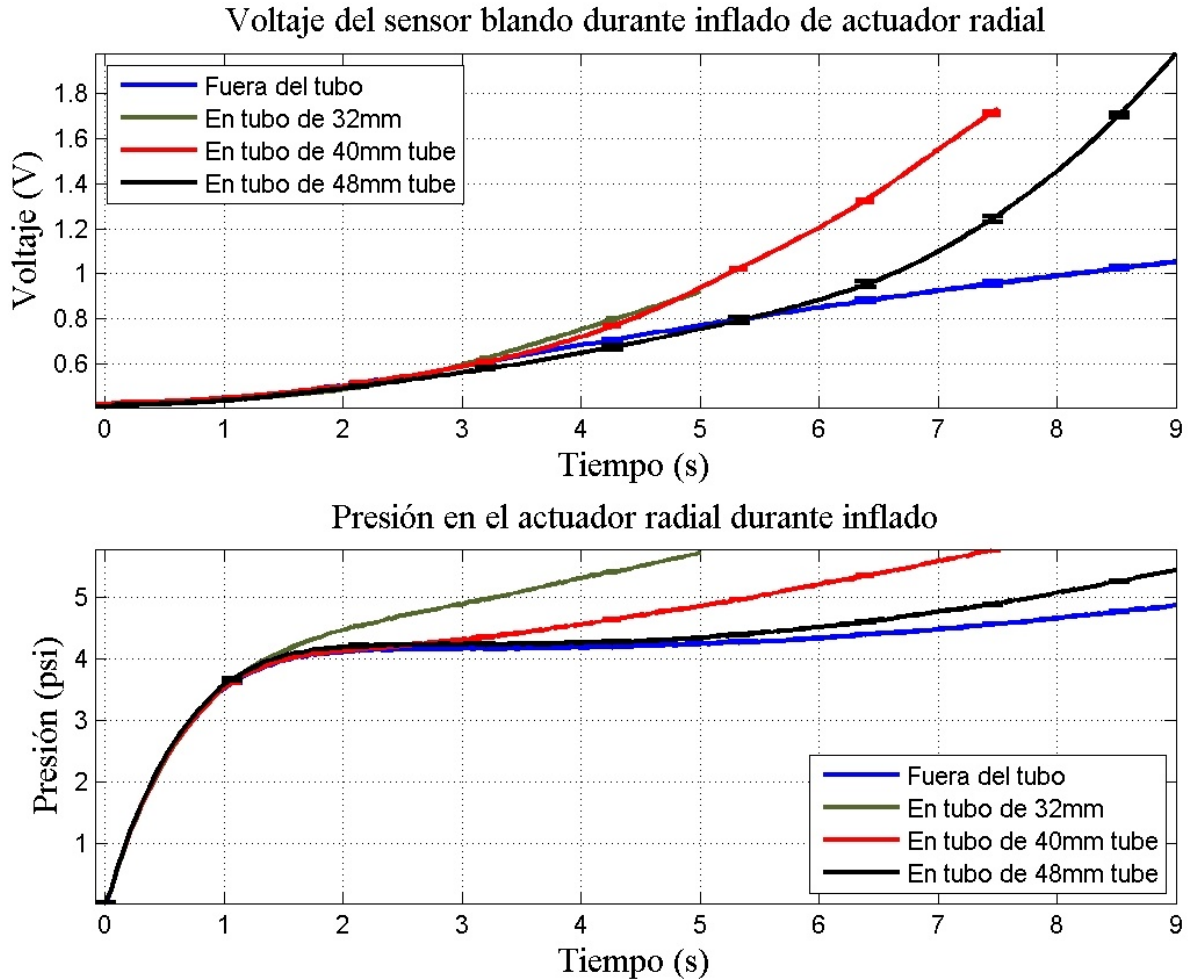
La señal que emite el sensor anexo al actuador radial (Figura 6.12) durante el inflado sin restricciones es aparentemente lineal. El sensor no se deforma a lo ancho junto con el cambio de altura en el actuador.

Existe una clara divergencia de la línea de control cuando el actuador hace contacto con las paredes de un tubo. De la Figura 6.12 se aprecia como aumenta la pendiente tras este fenómeno para 3 diámetros interiores de tubos cilíndricos. Esto ocurre tanto en la señal del sensor blando como en la de presión. En el gráfico de presión también se observa una divergencia cuando ocurre el contacto respecto a la curva de control, sin embargo, esta es más compleja de analizar que la de voltaje, pues su pendiente varía bastante.

Si bien, modelar el comportamiento tras el contacto permitiría obtener más información de la cavidad o/y la presión interna del actuador, para que ocurran las transiciones en el programa de control basta reconocer que existe un alza en la pendiente, por lo que se propone como trabajo futuro.

La forma de la señal tras el contacto en tubos de 40 y 48 milímetros de diámetro anterior es bastante similar.

Dado lo anterior, se reconoce que el sensor implementado es efectivo para detectar contacto del actuador radial, y que el programa de control escrito basado en el cambio de la derivada sería útil, pues la curva de control es constante y el sensor tiene alta repetitibilidad.



**Figura 6.12:** Señal del sensor blando y de presión en actuador radial inflándose, dentro y fuera de cilindros de distinto diámetro interior.

El actuador radial logra una extensión promedio máxima de 57 milímetros (cerca de 70% de deformación, considerando sensor acoplado) aproximadamente a los 4.5 psi (Figura 6.13). El actuador falla por rotura del sensor y banda estriada, puesto que la tensión del hilo con que se cosen los extremos de las componentes termina cortando la silicona. Pegar los extremos con silicona solucionaría este problema.

Se observa que tras cierto umbral de presión, la deformación en el actuador se hace más notable. Una causa probable es la resistencia que hace la banda y sensor en el manto del actuador, pues está sujeta a presión. Una vez que se sobrepasa esta fuerza elástica, el actuador comienza a deformarse de forma más notable. La deformación se da tanto en la altura del actuador, como el diámetro.

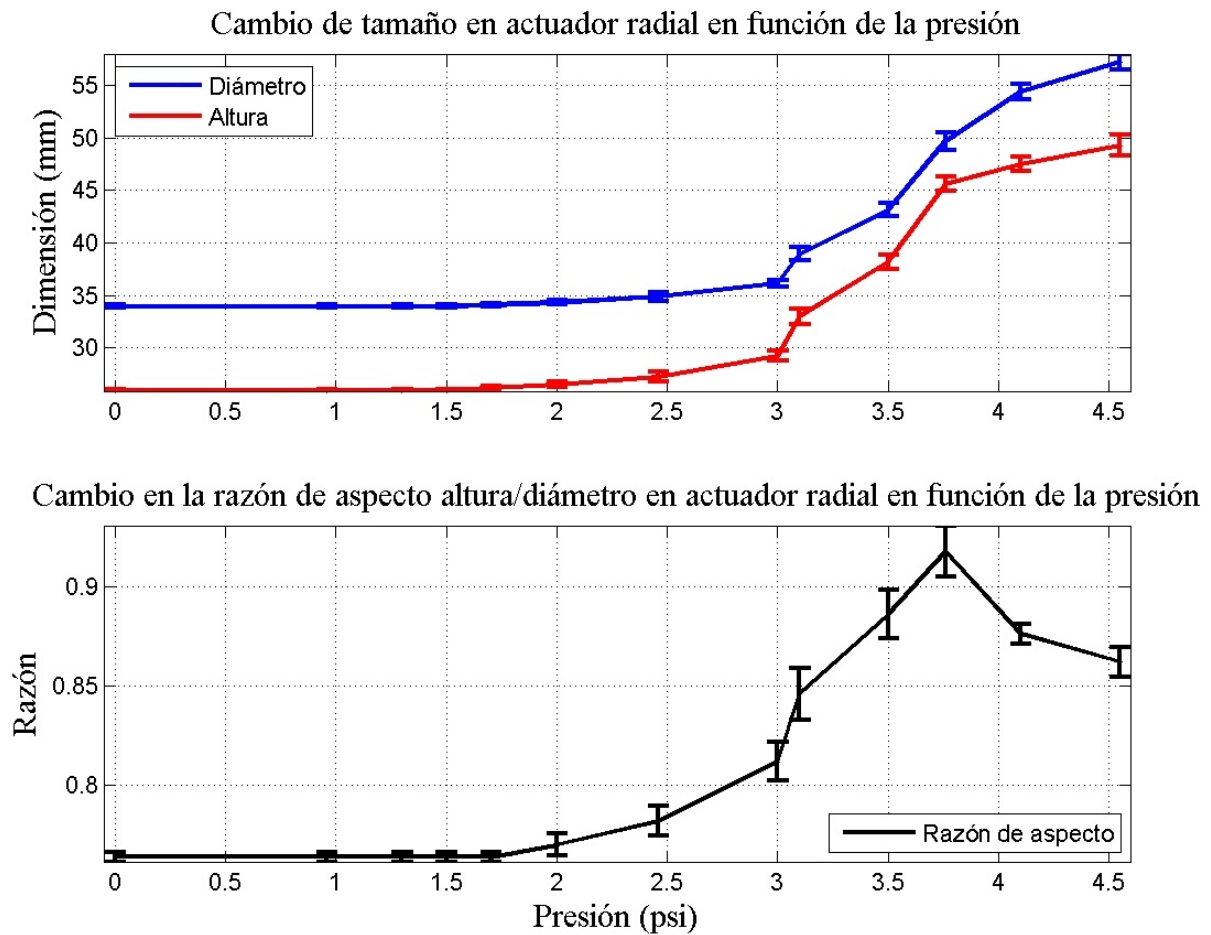
El aumento en la razón de aspecto señala que la altura aumenta en mayor proporción que el diámetro del actuador al ser presurizado. El gráfico de la Figura 6.14 indica que la deformación final en altura (90%) es mayor a la deformación en diámetro (70%) para el

rango de presiones ensayado, por lo que no sería posible decir que la deformación del actuador es preferentemente radial.

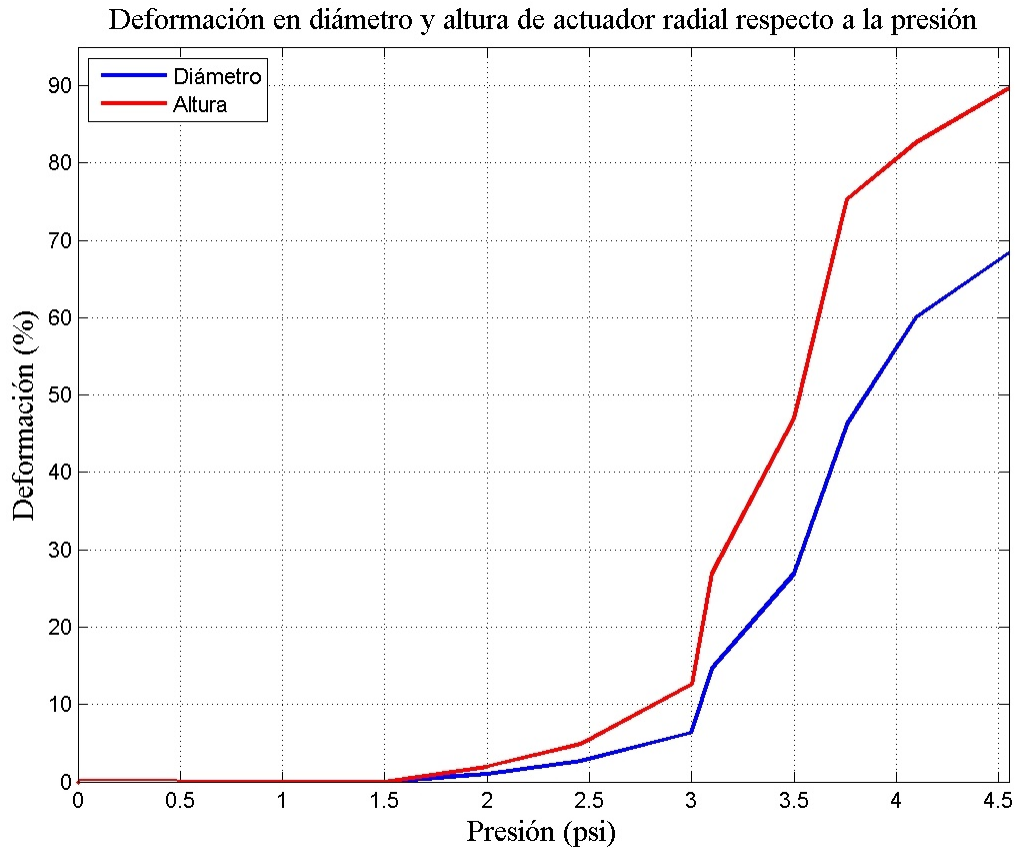
Una de las causas de esto es la falta de elementos que restrinjan la deformación en el sentido axial para este actuador. Por el contrario, la banda y sensor montados en el manto actúan como una restricción a la deformación en el sentido radial, similar a los o'ring incluidos en el actuador axial.

A pesar de estar fabricados con una silicona de menor resistencia (EcoFlex 0030) el espesor que posee el ensamble de la banda y sensor estarían limitando la extensión del actuador. Una solución puede ser disminuir esta dimensión en las componentes, o integrar los canales de metal líquido en el manto del actuador y la banda en su superficie.

El sensor y banda estriada poseen un espesor cercano a los 8 milímetros, por lo que aumentan el diámetro inicial del actuador radial a aproximadamente 35 milímetros, como indica el gráfico de la Figura 6.13. Considerando el diámetro inicial del actuador, la deformación máxima correspondería a 179%, por lo que el actuador radial sí sería de deformación preferente radial bajo este punto de vista.



**Figura 6.13:** Resultados de ensayo presión deformación en actuador axial.



**Figura 6.14:** Deformación en diámetro y altura de actuador radial.

El actuador axial alcanzó un tamaño de 56 milímetros promedio (40% de deformación) aproximadamente a 5 psi (Figura 6.15). El actuador falla por el desplazamiento de los o-rings de los surcos donde se ubican, debilitando un sector del actuador, el cual comienza a deformarse aceleradamente. Esto se podría evitar aumentando la cantidad de o-rings en el manto del actuador, prolongando la extensión máxima. Se observa un indicio de esta falla en la Figura 6.17, entre el primer y segundo o-ring de abajo hacia arriba.

La razón de aspecto aumenta, lo que indica que la altura crece en mayor proporción que el diámetro. La Figura 6.16 valida que la deformación del actuador es preferentemente axial (40% en comparación a 15%). La deformación radial se da en el espacio entre o-rings por el desplazamiento de estos. Si bien, esta deformación es pequeña al inicio, sobre los 5 psi afecta notablemente al funcionamiento del actuador.

Por todo lo anterior, se estima que una presión segura para la ejecución de los actuadores es 4 psi, dado el diseño actual.

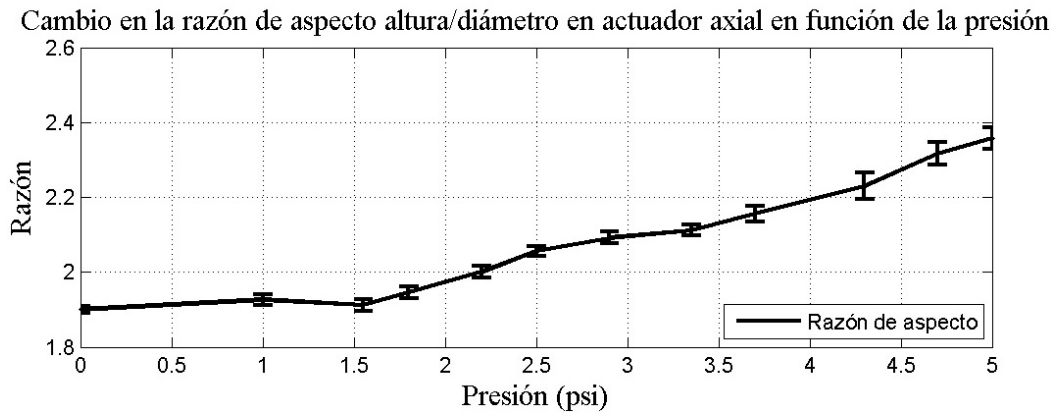
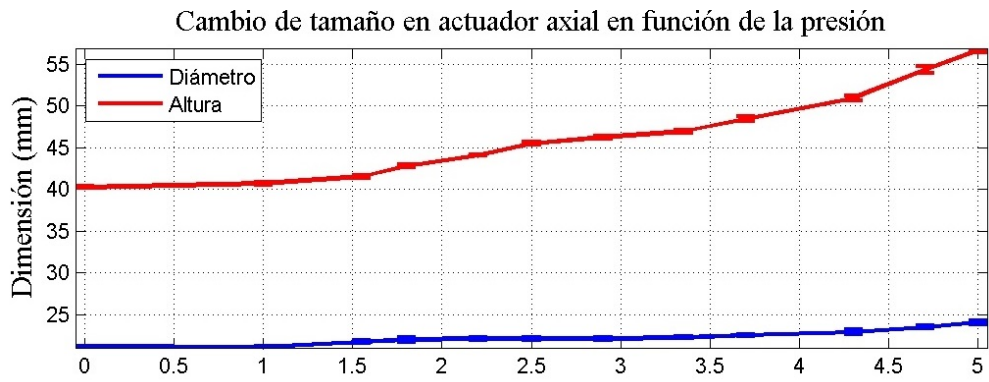


Figura 6.15: Resultados de ensayo presión deformación en actuador axial.

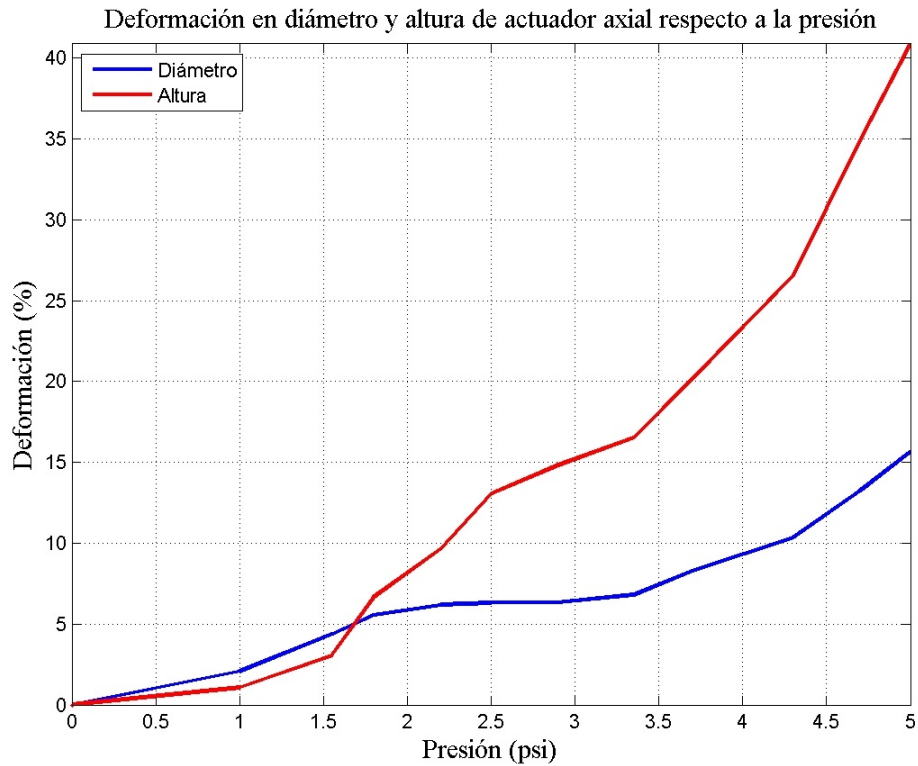
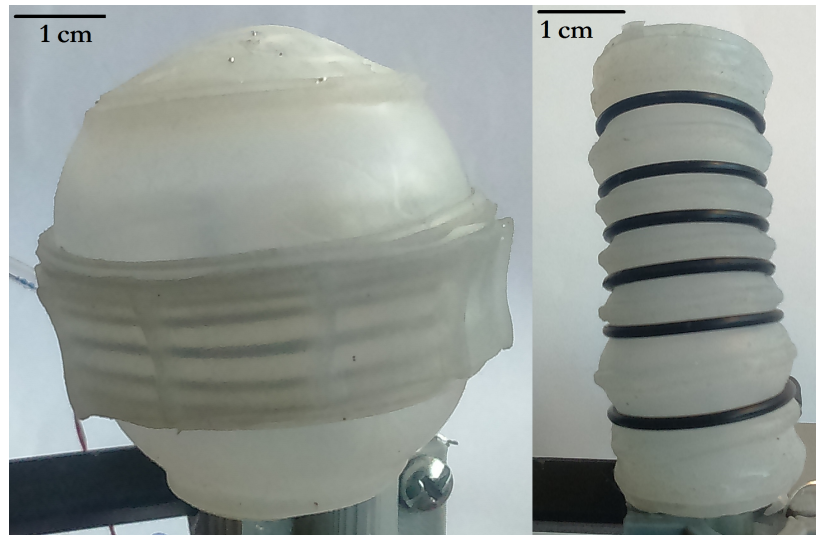


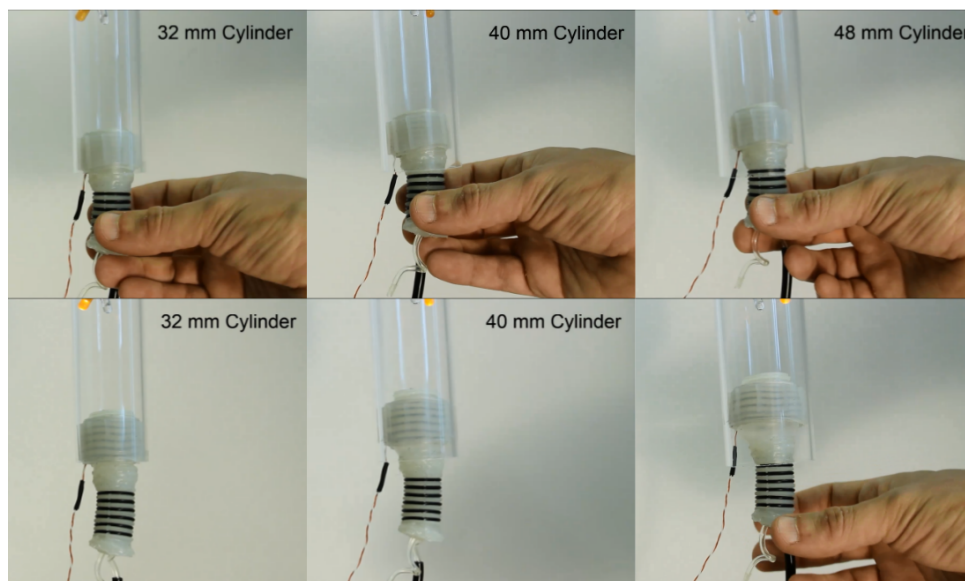
Figura 6.16: Deformación en diámetro y altura de actuador axial.



**Figura 6.17:** Actuadores en máxima extensión. A la izquierda radial, a la derecha axial.

### 6.3. Pruebas de funcionamiento

Los parámetros del controlador relativos a los set point de actuadores radiales y cálculo de derivadas fueron calibrados inicialmente mediante el experimento observado en la Figura 6.18, donde el robot se ubicaba e inflaba dentro de tubos de distinto diámetro. Un led de color amarillo indica cuando se da la condición de contacto, mientras que un led de color rojo indica el fin del desinflado. Los parámetros fueron optimizados cualitativamente, buscando minimizar el tiempo de inflado, sujeto a que el actuador pudiese mantenerse anclado de forma vertical.



**Figura 6.18:** Pruebas de contacto en tubos de diámetros 32, 40 y 48 mm. En el grupo superior, el gusano se posiciona manualmente dentro del tubo, en el inferior, se puede observar el LED amarillo encendido indicando contacto. En las fotografías, el robot no cuenta con el actuador trasero montado.

Tras este proceso, los parámetros obtenidos fueron calibrados posteriormente experimentando con el robot desplazándose en el resto de los montajes. Los parámetros del actuador axial se fijaron en el mínimo tiempo que permite que el actuador se desinflen y el máximo tiempo antes de que el actuador presente fallas. Los parámetros finales se observan en la Tabla 6.5.

**Tabla 6.5:** Última iteración de parámetros del controlador para movimiento del robot.

Set point para detectar contacto en cabeza	0.7 [V/s]
Set point para detectar fin de desinflado cabeza	-0.1 [V/s]
Set point para detectar contacto en cola	0.6 [V/s]
Set point para detectar fin de desinflado cola	-0.1 [V/s]
Tiempo de inflado de actuador axial	2250[ms]
Tiempo de desinflado de actuador axial	400[ms]
Histéresis para cabeza	0.1 [V/s]
Histéresis para cola	0.1 [V/s]
Tamaño de la ventana	25
Tasa de muestreo	29 [ms]
Tamaño de la ventana de datos	25

De acuerdo a las pruebas realizadas, exhibidas mediante fotografías en la Figura 6.19, Figura 6.20 y Figura 6.21, se demuestra que el sistema implementado permite al robot desplazarse en distintos tipos de cavidades utilizando el mismo controlador. El diagrama de estados permite una comprensión clara del proceso a implementar, pues se reconocen y describen estados como funciones y condiciones de transición como declaraciones condicionales dentro de estas funciones.

El programa implementado es sencillo y demuestra ser efectivo para que el robot desarrolle su algoritmo de movimiento.

El tamaño de los vectores de datos (cien) se elige considerando que el controlador no es capaz de cargar el programa para valores cercanos a 120, o bien, no funciona de forma correcta. Entonces,  $n$  no puede ser superior a cincuenta.

El aumento del valor  $n$  para la ventana de datos permite filtrar mejor el ruido, pues utiliza una mayor cantidad de datos para estimar los valores promedio. Sin embargo, esto retrasa la respuesta del controlador para el cálculo de la derivada, pues cada nuevo dato registrado afecta en menor medida el valor promedio de la ventana.

Al asignar una tasa de muestreo de un milisegundo e imprimir el tiempo que pasa entre cada actualización de datos (para validar), se observa que este intervalo corresponde en realidad a 29 milisegundos. Esto indica que el controlador no es capaz de ejecutar la rutina a mayor velocidad, por lo que existe un mínimo para la tasa de muestreo.

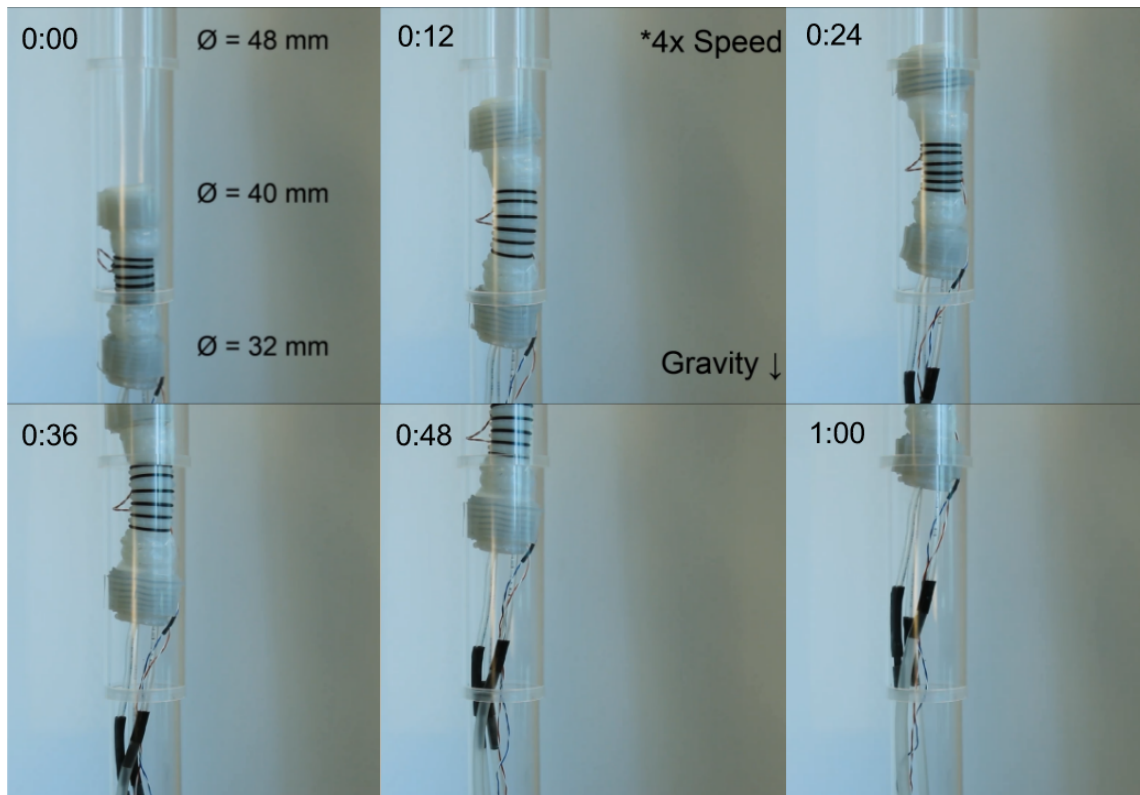
De acuerdo a los párrafos anteriores, cambiar el controlador por otro con mayores capacidades sería ideal para desarrollar futuras investigaciones (como incorporar más sensores). Por ejemplo, desarrollar una interfaz gráfica con Python y que este utilice comunicación serial para recibir datos desde del Arduino, procesar y enviar instrucciones. No obstante, el controlador actual demostró ser útil para validar el concepto de robot.

Frecuentemente, se observa que los actuadores radiales no se relajan cuando deben y el robot continúa con la fase siguiente, indicando que detecta falsos positivos. Esto debido a que la derivada de un actuador que está anclado puede ser positiva, cero o negativa justo antes de que entre a la fase de relajo, pues esta oscila en los procesos de compensación.

Por lo anterior, se decide igualar todos los valores del vector de datos por el último registrado antes de iniciar la fase de relajo. Si todos los valores del vector de datos son iguales antes del desinflado, estos serán un máximo respecto a los nuevos valores a registrar al relajar el actuador (pues empieza con el sensor extendido). Entonces, durante la fase de relajo, la derivada será inicialmente igual a cero, negativa mientras se desinfla, y finalmente similar a cero, pues se encontrará estático.

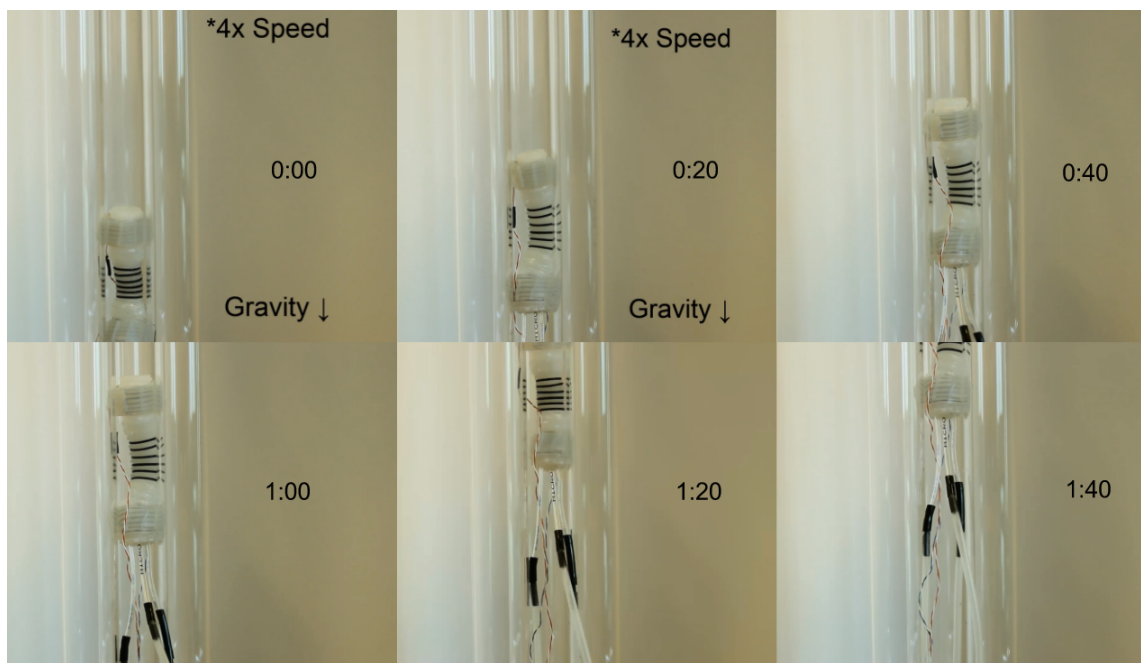
Luego, es posible utilizar un valor de referencia negativo con  $n$  suficientemente grande, pues al retardar la respuesta del controlador, este aún percibirá que se está relajando cuando el actuador podría ya estar estático. También, con  $n$  suficientemente pequeño, es posible comparar la derivada con un valor de referencia muy levemente superior a cero, lo cual se dará por efecto del ruido y cuando el actuador ya se encuentre en equilibrio.

Para darle más autonomía al sistema, el botón de emergencia podría ser reemplazado por expresiones condicionales en el programa. Por ejemplo, si el sensor se satura o pierde continuidad (lo que también causa saturación, como indica la ecuación 5.6 si se considera  $R_x$  muy grande), el actuador podría seguir inflándose hasta reventar, sin que el controlador sea capaz de percibirlo adecuadamente y tome una decisión. Esto se soluciona fácilmente llamando a la función de emergencia cuando la señal del sensor sobrepase cierto valor.

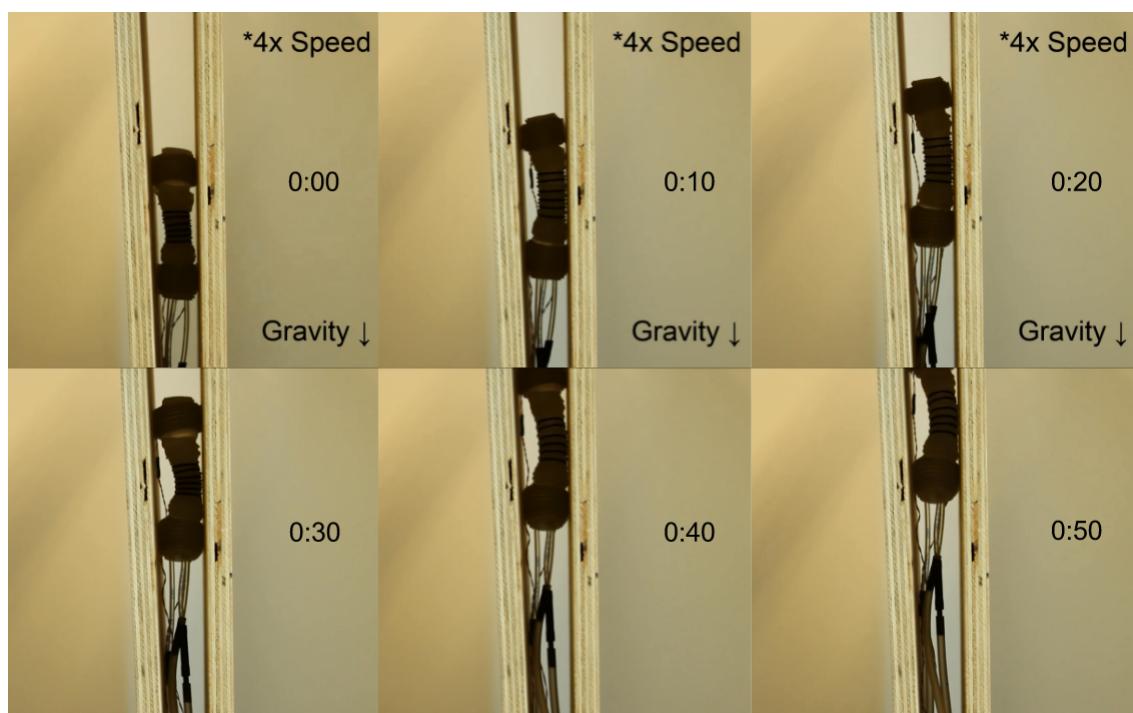


**Figura 6.19:** Robot desplazándose en tubo cilíndrico de acrílico de diámetro variable. Formato de marca de tiempo minutos:segundos.





**Figura 6.20:** Robot desplazándose en entre 3 tubos cilíndrico de acrílico, de diámetros 32, 40 y 48 mm. Formato de marca de tiempo minutos:segundos.



**Figura 6.21:** Robot desplazándose entre dos planchas de madera divergentes. Formato de marca de tiempo minutos:segundos.

El sistema implementado es bastante robusto, pues el algoritmo de control no falló en ningún momento en los últimos ensayos, permitiendo al robot trepar verticalmente. Si el controlador hubiese fallado, el robot se habría precipitado al suelo. Se observa que el gusano puede al menos levantar su propio peso en movimiento vertical.

En la primera prueba (Figura 6.19) el movimiento del robot es más efectivo que en las otras dos, dado que en la segunda y tercera el actuador de la cabeza tiende a descender al retraer la cola hacia arriba. Esto ocurre probablemente porque el actuador en las dos últimas pruebas está menos anclado que en la primera, donde existe mayor superficie de contacto. Por ejemplo, la falta de sujeción en la prueba de placas divergentes producía que el actuador de cabeza se deslizara hacia abajo levemente cuando se retraía el cuerpo hacia arriba, pues la cola rozaba con la pared al desplazarse hacia arriba, resistiéndose al movimiento. Algo similar se experimenta en el segundo montaje, pero en menor medida.

Se presume que el contacto se detecta más rápidamente mientras menos superficie de contacto exista entre la pared y el actuador, dado que la presión se concentra en un sector, cerrando más rápidamente los canales resistivos. Se estima que realizar una prueba que compare la señal del sensor respecto a la cantidad de superficie de la cavidad en un diámetro fijo sería útil, así es posible extrapolar en qué tipo de cavidades el robot podría funcionar apropiadamente.

La velocidad del robot es relativamente baja, considerando el tiempo que demora cada prueba y la longitud de los tramos respecto al cuerpo del robot.

De ser necesario, se podría utilizar dos compresores del mismo modelo que los actuales en paralelo, para aumentar el flujo y entonces la velocidad del robot. Además, se considera que el espesor de la banda estriada y el sensor agregan una resistencia notable a la pared del actuador, aumentando el tiempo de deformación.

Se propone una alternativa de sistema neumático para el robot (Anexo B), el cual utiliza un compresor o estanque, el flujo se distribuye a actuadores a través de válvulas de solenoide, y luego se purga por una segunda válvula. De esta forma se puede utilizar un único compresor de gran tamaño, junto con una válvula de alivio para no sobrepasar la presión de falla de los actuadores, o bien, utilizar un estanque presurizado.

Dado que los sensores y banda estriada se encuentran fijados al actuador por fuerza elástica, el roce repetido con las paredes de la cavidad los desplazan de su posición, cambiando la forma en que se mide el contacto. Se estima necesario pegar el sensor al manto, o bien, integrarlo en el diseño del actuador mismo, por este y otros inconvenientes ya señalados.

Fueron necesarios 3 robots para realizar los ensayos descritos. El primero falló por fatiga, explotando el actuador delantero en un nivel bajo de deformación. El segundo robot falla también en el actuador delantero, siendo la causa el contacto que había en el interior entre el manto y la punta de una manguera, que termina por puncionar el actuador tras repetidos ciclos.

# Capítulo 7

## Conclusiones

### 7.1. Cumplimiento de objetivos

Respecto a los objetivos específicos planteados en este trabajo:

Se diseña y fabrica un robot blando compuesto de 2 tipos actuadores neumáticos de forma cilíndrica, los cuales imitan un metámero de un gusano y permiten al robot desplazarse de forma peristáltica mediante retroalimentación de sensores blandos en su estructura actuando como piel artificial.

Se caracterizan las componentes que forman parte del robot, generando un modelo elongación-voltaje para el sensor blando y curvas de presión-deformación para los actuadores, entre otros datos que se obtienen y permiten generar adecuadamente un controlador.

Se diseña una estrategia de control, definiendo fases y estados de componentes en un ciclo de movimiento, cuyas condiciones de transición requieren el uso de la derivada promedio de la señal de sensores blandos y el tiempo transcurrido.

Se implementa un sistema de control compuesto principalmente de un circuito neumático y otro eléctrico. El circuito neumático cuenta con un compresor y válvula de solenoide para cada actuador del robot, al cual se unen mediante una manguera. El circuito eléctrico utiliza un Arduino UNO y una PCB para manipular el circuito neumático en función de las señales de los sensores blandos. El sistema se ensambla en una base y los circuitos se sitúan en paneles impresos en 3D, para facilitar el traslado del robot.

El robot se prueba en 3 montajes de diferentes formas, un tubo con cambio de diámetro, la cavidad formada entre tres tubos en paralelo y un par de planos divergentes. El controlador demuestra ser altamente efectivo, ya que el robot no solamente puede detectar el contacto y desplazarse, sino que también ocurre sin errores, puesto que los montajes se disponen de forma vertical y ante un falso positivo el robot se precipitaría al suelo.

Por lo que se cumplen en su totalidad los cinco objetivos específicos fijados.

Finalmente, se demuestra que el robot implementado cumple con el objetivo general del trabajo, desplazándose mediante un controlador de lazo cerrado utilizando sensores blandos. Además, se generan videos de las pruebas y se describen técnicamente las características principales de las componentes que forman el sistema, cumpliendo los alcances.

## 7.2. Conclusiones generales

El robot tiene potencial para ser aplicado en inspección de tuberías. Las características de la silicona le permitirían desplazarse en ambientes de alta temperatura y corrosivos, incluso dentro de seres vivos.

El sistema de sensores podría ser aplicado tanto en otros robots o prótesis que requieran sentido táctil.

El escaso costo en materiales del robot (sin considerar costos de envío y sistema de control) y la simpleza del proceso de manufactura elevan el potencial de investigación que posee, pudiendo ser replicado en otras partes del mundo con facilidad.

El concepto del robot demuestra ser de interés científico, dado que durante el período en que se realiza este trabajo se envía un paper relativo al robot a una conferencia de robótica y biomimética (IEEE International Conference On Robotics And Biomimetics, Dec. 3 – Dec. 7, 2016, Qingdao, China), quedando finalista<sup>1</sup>.

Este robot (diseñado y fabricado por el estudiante) es de mayor tamaño y no cuenta con retroalimentación de sensores blandos, si no que se efectuaba mediante sensores de presión piezoeléctricos. En tal publicación, también se demuestra que el robot es capaz de flexionar su cuerpo durante el movimiento para sobrepasar un codo de 45° en una tubería.

## 7.3. Limitaciones

- Las mangueras limitan el desplazamiento máximo que puede tener el robot. El tamaño y rigidez de estas también afectan el movimiento de este.
- Mover todo el sistema de control propuesto al interior del robot requeriría componentes extremadamente pequeñas considerando el tamaño actual de este. Además, perdería resiliencia y flexibilidad.
- En caso que exista una bifurcación en la ruta del robot, este no puede tomar una decisión, pues no cuenta con sensores ni actuadores suficientes.
- Siendo el robot neumático y blando, es extremadamente frágil ante geometrías u objetos suficientemente punzantes.

---

<sup>1</sup>Design, Fabrication and Control of a Multi-Material–Multi-Actuator Soft Robot Inspired by Burrowing Worms, Ariel A. Calderon, Joakin C. Ugalde, Juan Cristóbal Zagal, and Néstor O. Pérez-Arancibia. <http://robio2016.org/program/best-paper-award-finalists/>

## 7.4. Trabajo futuro

Se sugieren las siguientes posibilidades para continuar desarrollando el robot:

- Agregar un sensor de deformación al actuador central, pues de esta forma se podría detectar cuando el robot colisione con un obstáculo, si existen pérdidas en el actuador y conocer el tamaño en tiempo real.
- Cambiar el diseño del actuador radial para evitar deformación axial, de esta forma se tiene mayor control y eficiencia en el movimiento del robot.
- Utilizar 3 actuadores axiales en paralelo en lugar de uno, de esta forma el robot puede cambiar su orientación y moverse por encrucijadas.
- Incorporar una cámara en la parte frontal del robot, para experimentar con su capacidad para exploración.
- Integrar el sensor en el manto del actuador.
- Utilizar compresores de mayor flujo y optimizar los parámetros de funcionamiento del robot para aumentar la velocidad de desplazamiento del sistema.
- Reemplazar el sistema de control y actuación por el concepto del robot *Octobot* (control por fluidos en microcanales y potencia neumática a través de combustión), para que el robot sea blando y autónomo.
- Estudiar y modelar el comportamiento del sensor tras el contacto, tomando en cuenta la superficie de contacto, la forma de la cavidad, forma y cantidad de estrías, etc.

# Bibliografía

- [1] **Marchese Andrew D., Onal Cagdas D., and Rus Daniela.** *Autonomous Soft Robotic Fish Capable of Escape Maneuvers Using Fluidic Elastomer Actuators*. Soft Robotics. March 2014, 1(1): 75-87. doi:10.1089/soro.2013.0009.
- [2] **Festo BionicKangaroo: Recovering, storing and releasing energy based on a natural model** BionicKangaroo Brochure.
- [3] **J. Yu, R. Ding, Q. Yang, M. Tan, W. Wang and J. Zhang** *On a Bio-inspired Amphibious Robot Capable of Multimodal Motion* IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 17(5), pp. 847-856, Oct. 2012. doi: 10.1109/TMECH.2011.2132732
- [4] **Burden, S. ; Xiao-Yu Fu ; Sastry, S.S. ; Fearing, R.S.** *Bio-inspired design and dynamic maneuverability of a minimally actuated six-legged robot* . Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on.
- [5] **Robert F. Shepherd, Filip Ilievskia , Wonjae Choia, Stephen A. Morina, Adam A. Stokesa, Aaron D. Mazzeoa, Xin Chena, Michael Wang, and George M. Whitesides** *Multigait soft robot* PNAS, 108(51) ;20400–20403, doi: 10.1073/pnas.1116564108.
- [6] **Tolley Michael T., Shepherd Robert F., Mosadegh Bobak, Galloway Kevin C., Wehner Michael, Karpelson Michael, Wood Robert J., and Whitesides George M.** *A Resilient, Untethered Soft Robot* Soft Robotics. September 2014, 1(3): 213-223. doi:10.1089/soro.2014.0008.
- [7] **Eric Brown, Nicholas Rodenberg, John Amend, Annan Mozeika, Erik Steltz, Mitchell R. Zakin, and Hod Lipson, and Heinrich M. Jaeger** *Universal robotic gripper based on the jamming of granular material* Published online 2010 Oct 25. doi: 10.1073/pnas.1003250107 PMID: PMC2973877
- [8] **Bianca S. Homberg, Robert K. Katzschmann, Mehmet R. Dogar, and Daniela Rus** *Haptic Identification of Objects using a Modular Soft Robotic Gripper* Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on 28 Sept.-2 Oct. 2015 DOI: 10.1109/IROS.2015.7353596
- [9] **Michael Wehner, Ryan L. Truby, Daniel J. Fitzgerald, Bobak Mosadegh, George M. Whitesides, Jennifer A. Lewis and Robert J. Wood** *An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots* Nature 536, 451–455 (25 August 2016) doi:10.1038/nature19100

- [10] **Mosadegh, B. et al.** *Integrated elastomeric components for autonomous regulation of sequential and oscillatory flow switching in microfluidic devices.* Nat. Phys. 6, 433–437 (2010).
- [11] **Fionnuala Connolly, Panagiotis Polygerinos, Conor J. Walsh, and Katia Bertoldi** *Mechanical Programming of Soft Actuators by Varying Fiber Angle* Soft Robotics 2(1), 2015 Mary Ann Liebert, Inc. DOI: 10.1089/soro.2015.0001
- [12] **M Follador, M Cianchetti, A Arienti and C Laschi** *A general method for the design and fabrication of shape memory alloy active spring actuators* Published 23 October 2012, 2012 IOP Publishing Ltd, Smart Materials and Structures, 21(11)
- [13] **Sangok Seok, Cagdas D. Onal, Robert Wood, Daniela Rus, and Sangbae Kim** *Peristaltic locomotion with antagonistic actuators in soft robotics* Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. Location: Anchorage, AK. 3-7 May 2010, Page(s): 1228 - 1233. 10.1109/ROBOT.2010.5509542
- [14] **Petralia, M.T.; Wood, R.J.** *Fabrication and analysis of dielectric-elastomer minimum-energy structures for highly-deformable soft robotic systems* 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, 2010, pp. 2357-2363. doi: 10.1109/IROS.2010.5652506
- [15] **Matthias Schulke, Lars Hartmann, Carsten Behn** *Worm-like locomotion systems: Development of drives and selective anisotropic friction structures* 56th International Scientific Colloquium Ilmenau University of Technology, 12 – 16 September 2011 URN: urn:nbn:gbv:ilm1-2011iwk:5
- [16] **Kim J. Quillin** *Kinematic scaling of locomotion by hirsutic animals: Ontogeny of peristaltic crawling by the earthworm* The Journal of Experimental Biology 202, 661–674 (1999) 661 Printed in Great Britain © The Company of Biologists Limited 1999 JEB1661
- [17] **Sungmook Jung, Seungki Hong, Jaemin Kim<sup>1</sup>, Sangkyu Lee, Taeghwan Hyeon, Minbaek Lee and Dae-Hyeong Kim** *Wearable Fall Detector using Integrated Sensors and Energy Devices* Scientific Reports 5, Article number: 17081 (2015) doi:10.1038/srep17081
- [18] **Jae-Woong Jeong , Woon-Hong Yeo , Aadeel Akhtar , James J. S. Norton , Young-Jin Kwack , Shuo Li , Sung-Young Jung , Yewang Su , Woosik Lee , Jing Xia , Huanyu Cheng , Yonggang Huang , Woon-Seop Choi , Timothy Bretl , and John A. Rogers** *Materials and Optimized Designs for Human-Machine Interfaces Via Epidermal Electronics* Advanced Materials, 25(47), December 17 - 2013, doi: 10.1002/adma.201301921.
- [19] **Yong-Lae Park, Member, IEEE, Bor-Rong Chen, Member, IEEE, and Robert J. Wood, Member, IEEE** *Design and Fabrication of Soft Artificial Skin Using Embedded Microchannels and Liquid Conductors* IEEE Sensors Journal, 12(8), August 2012 2711
- [20] **Joseph T. Muth, Daniel M. Vogt, Ryan L. Truby, Yiğit Mengüç, David B. Kolesky, Robert J. Wood, Jennifer A. Lewis** *Embedded 3D Printing of Strain Sensors within Highly Stretchable Elastomers* 16 June 2014, DOI:10.1002/adma.201400334

- [21] **Rodrigo Hernández Pellicer** *ME4501: Fundamentos de Control de Sistemas* Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica.
- [22] **Rolewicz, Stefan** *Functional analysis and control theory: Linear systems* Mathematics and its Applications (East European Series) 1987.
- [23] **Samarjit Chakraborty** *Formal Languages and Automata Theory - Regular Expressions and Finite Automata* Computer Engineering and Networks Laboratory Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich March 17, 2003



## Anexos

# Anexo A

## Recursos utilizados

A continuación, se indican los principales recursos utilizados, su cantidad entre paréntesis y link a datos técnicos.

### A.1. Componentes mecánicos

- Compresor de diafragma Koge KPM12A-3A (3): <http://www.koge.com/>
- Válvulas de solenoide Conjoin CJV23 (3): <http://www.conjoin.com.cn/>
- Válvula de alivio Airtrol RV-5300-30: <http://airtrolinc.com/rv-5200-rv-5300-miniature-relief-valve/>
- Manguera de 3 mm.
- Manguera de 5 mm.
- Conector de mangueras de 3 entradas (3).

### A.2. Componentes electrónicos

- Transistor MOSFET IRF540(6): <http://pdf1.alldatasheet.com/>
- Regulador de voltaje LM317: <http://www.onsemi.com/>
- Batería LiPo S2 850maH Zippy: <http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/>
- Amplificador instrumental INA128: <http://www.ti.com/product/INA128>
- Arduino UNO: <http://arduino.cl/arduino-uno/>
- Sensor de presión Honeywell ASDX: <http://sensing.honeywell.com/>

### A.3. Máquinas

- Impresora 3D Objet30 de Stratasys: <http://www.imprimalia3d.com/services/>
- Impresora 3D Replicator 2 de Makerbot: <http://www.stratasys.com/>

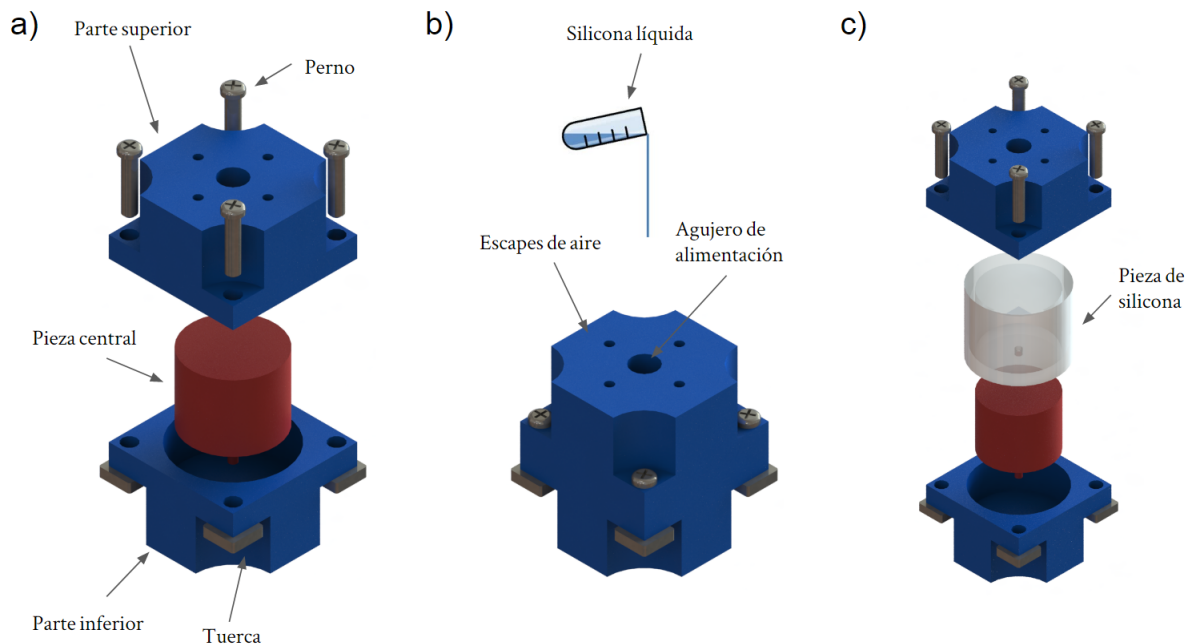
### A.4. Materiales

- Filamento Plástico 1kg PLA: <https://www.toybuilderlabs.com/>
- Silicona EcoFlex 0030: <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-30/>
- Silicona EcoFlex 0050: <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-50/>
- Galinstan: <http://www.geratherm.de/>

## Anexo B

# Planos, esquemáticos y otros

### B.1. Molde de inyección

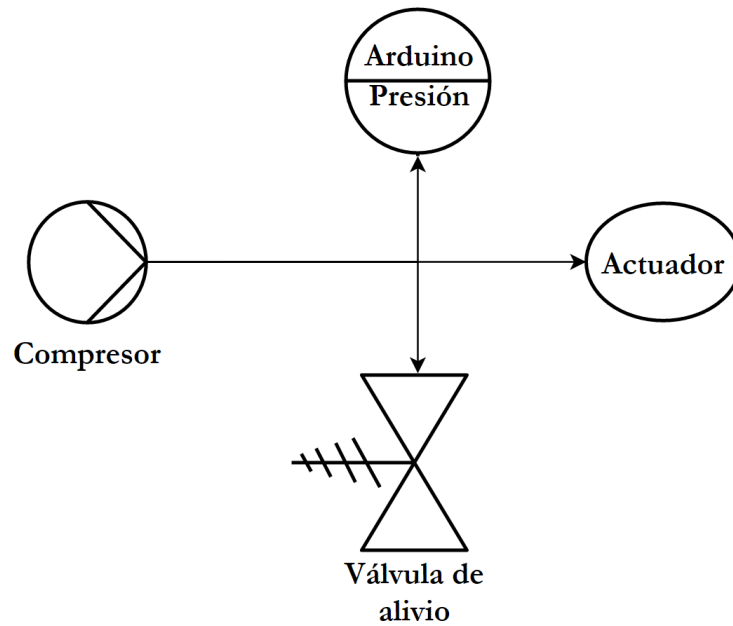


En (a), la pieza central se acopla a la parte inferior a través de una varilla que se extiende de la última hacia un agujero en el centro de la primera. La parte superior se aperna a la parte inferior.

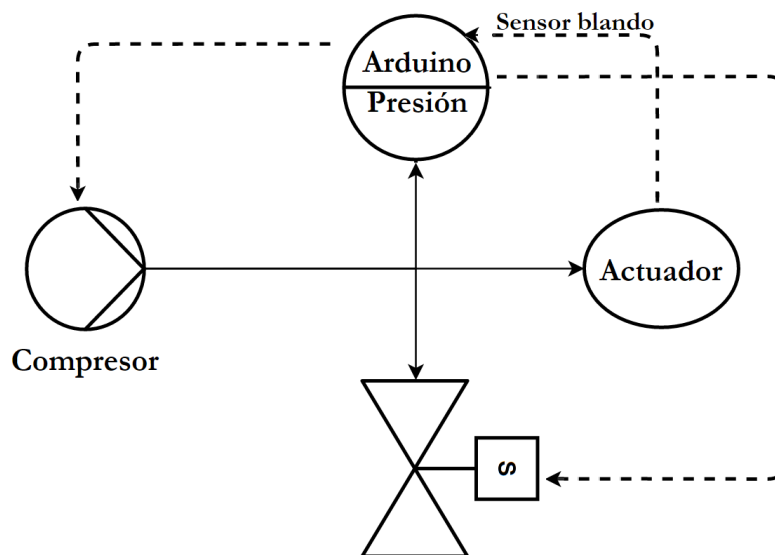
En (b) La silicona líquida se vierte en el agujero de alimentación, o bien, se inyecta con una jeringa. Finalmente, en (c), el molde se abre y se retira la pieza de silicona, la pieza central se expulsa a través del agujero que deja la varilla de alineamiento en la silicona. Este agujero se abre gracias a la elasticidad de la silicona.

## B.2. Neumática

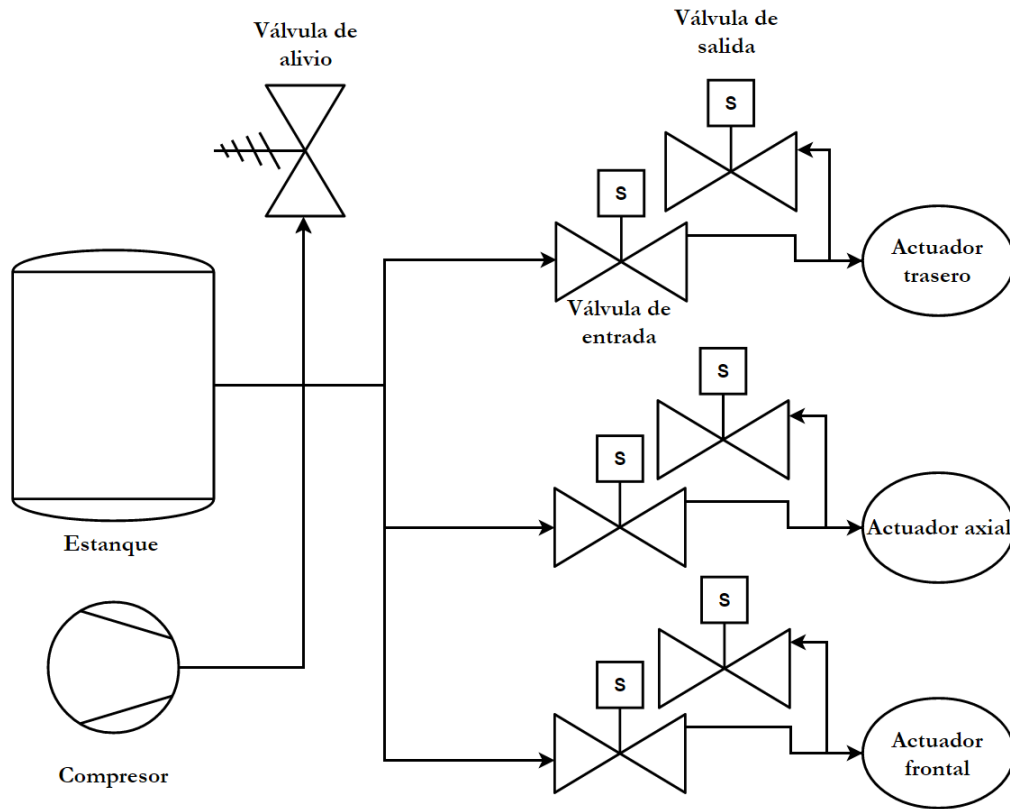
### B.2.1. Circuito neumático para ensayo de presión-deformación en actuadores



### B.2.2. Circuito neumático para ensayo en tubos



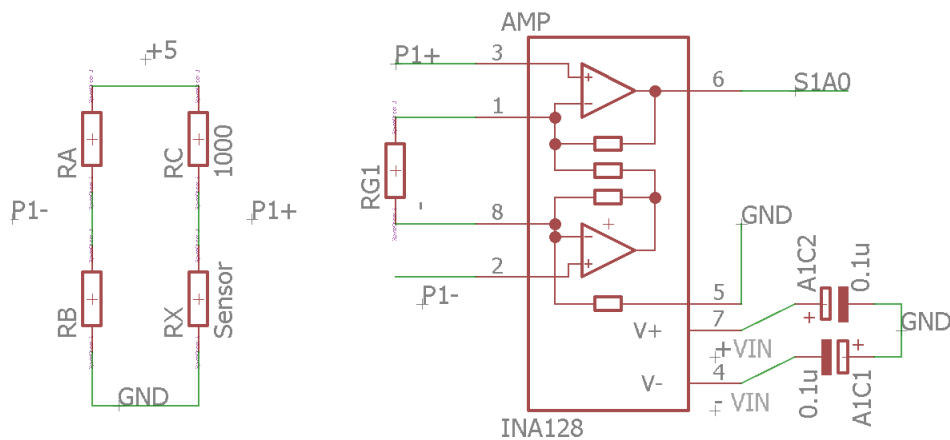
### B.2.3. Circuito neumático propuesto



### B.3. Electrónica

#### B.3.1. Circuitos para ensayos de caracterización

##### Circuito de amplificación



**Parámetros utilizados en ensayo de deformación-voltaje para el sensor**

$R_a$	10000 [ $\Omega$ ]
$R_b$	320 [ $\Omega$ ]
$R_c$	100 [ $\Omega$ ]
$R_g$	1000
$V_{in}$	3.7 [V]

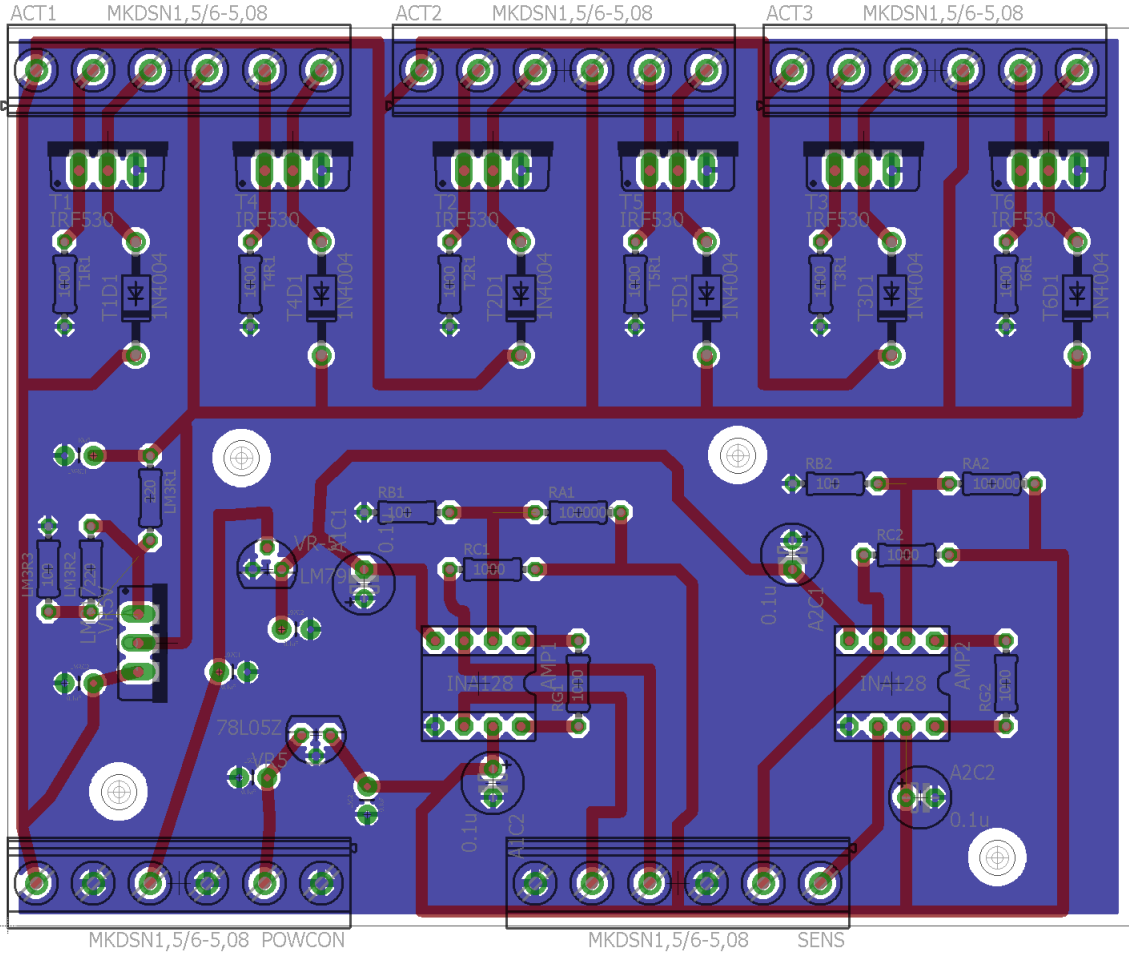
**Parámetros utilizados en ensayo de temperatura resistencia del sensor**

$R_a$	1000000 [ $\Omega$ ]
$R_b$	100 [ $\Omega$ ]
$R_c$	1000 [ $\Omega$ ]
$R_g$	470
$V_{in}$	5 [V]

**Parámetros utilizados en ensayo de contacto en tubos**

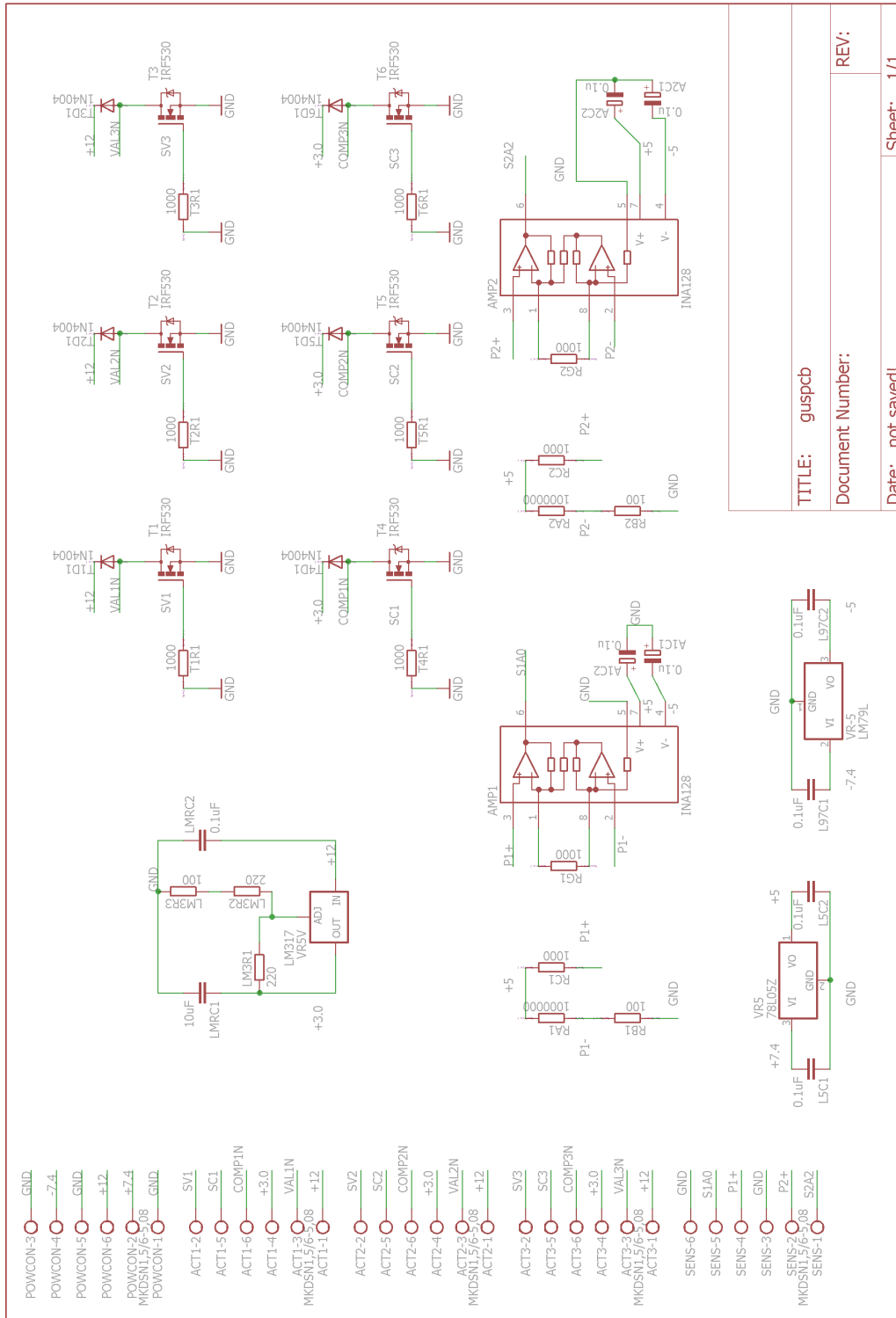
$R_a$	10000 [ $\Omega$ ]
$R_b$	320 [ $\Omega$ ]
$R_c$	100 [ $\Omega$ ]
$R_g$	470
$V_{in}$	7.4 [V]

### B.3.2. Diagrama de PCB



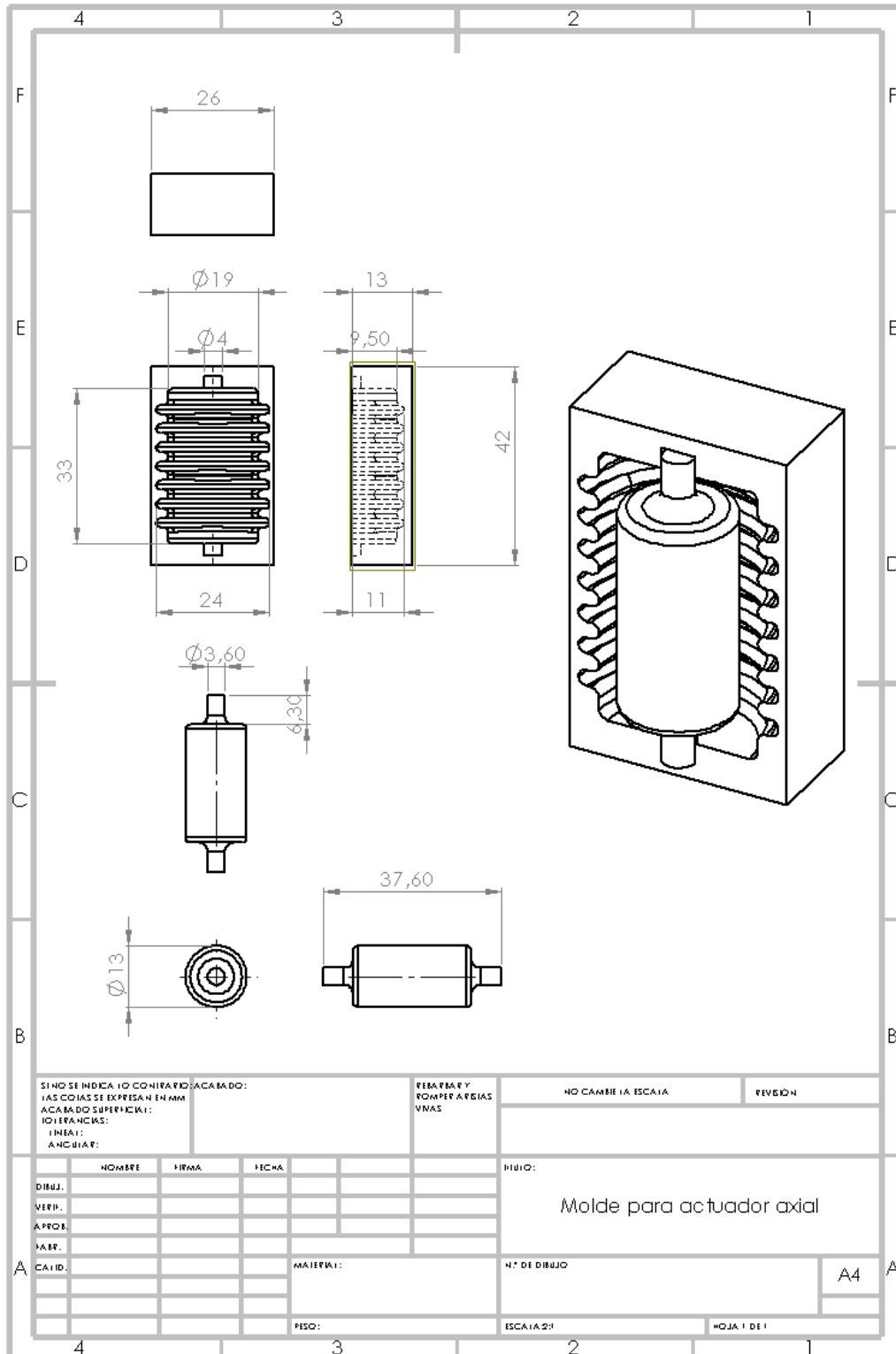


### B.3.3. Esquema de circuito de control

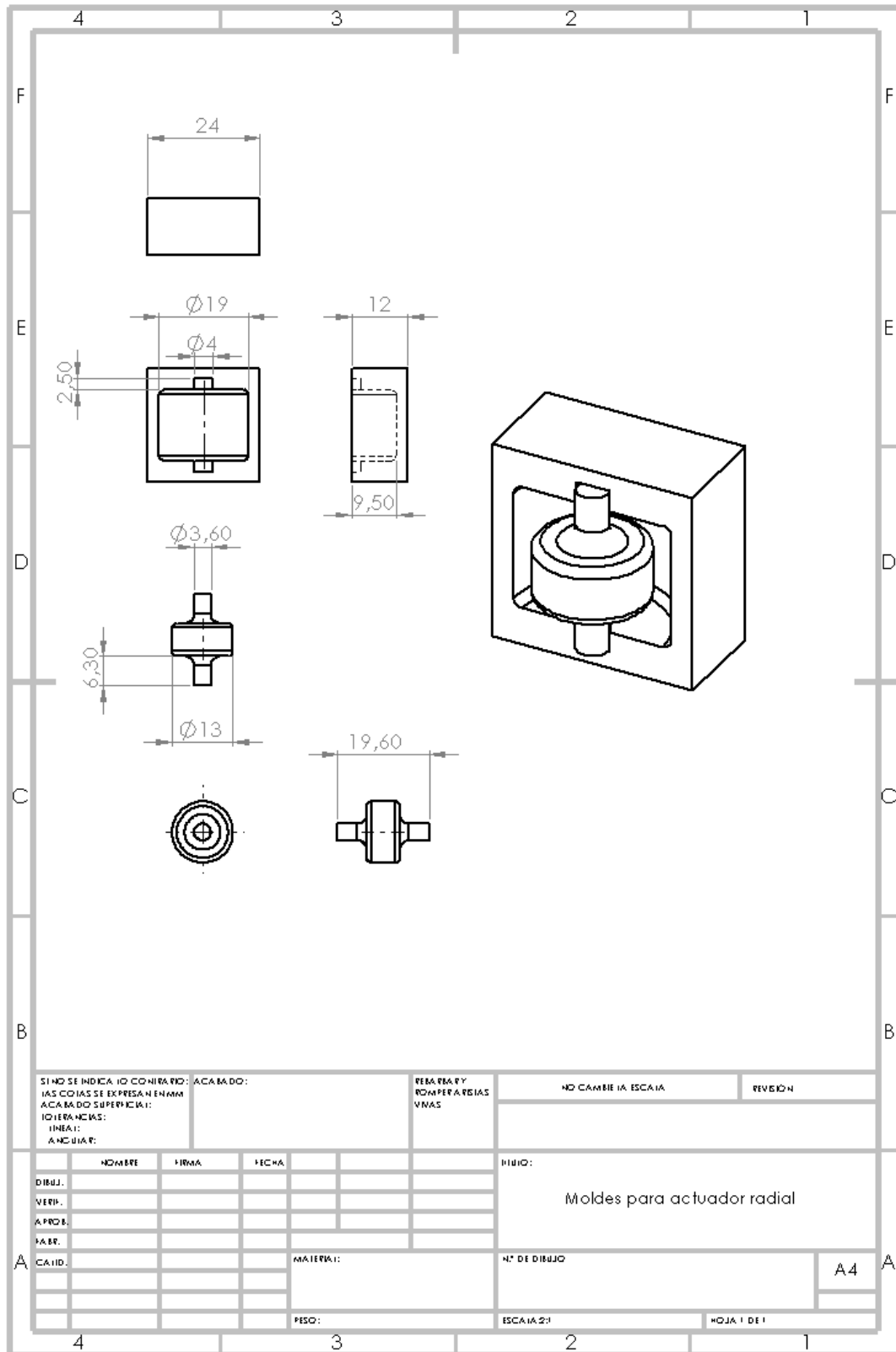


## B.4. Planos de moldes

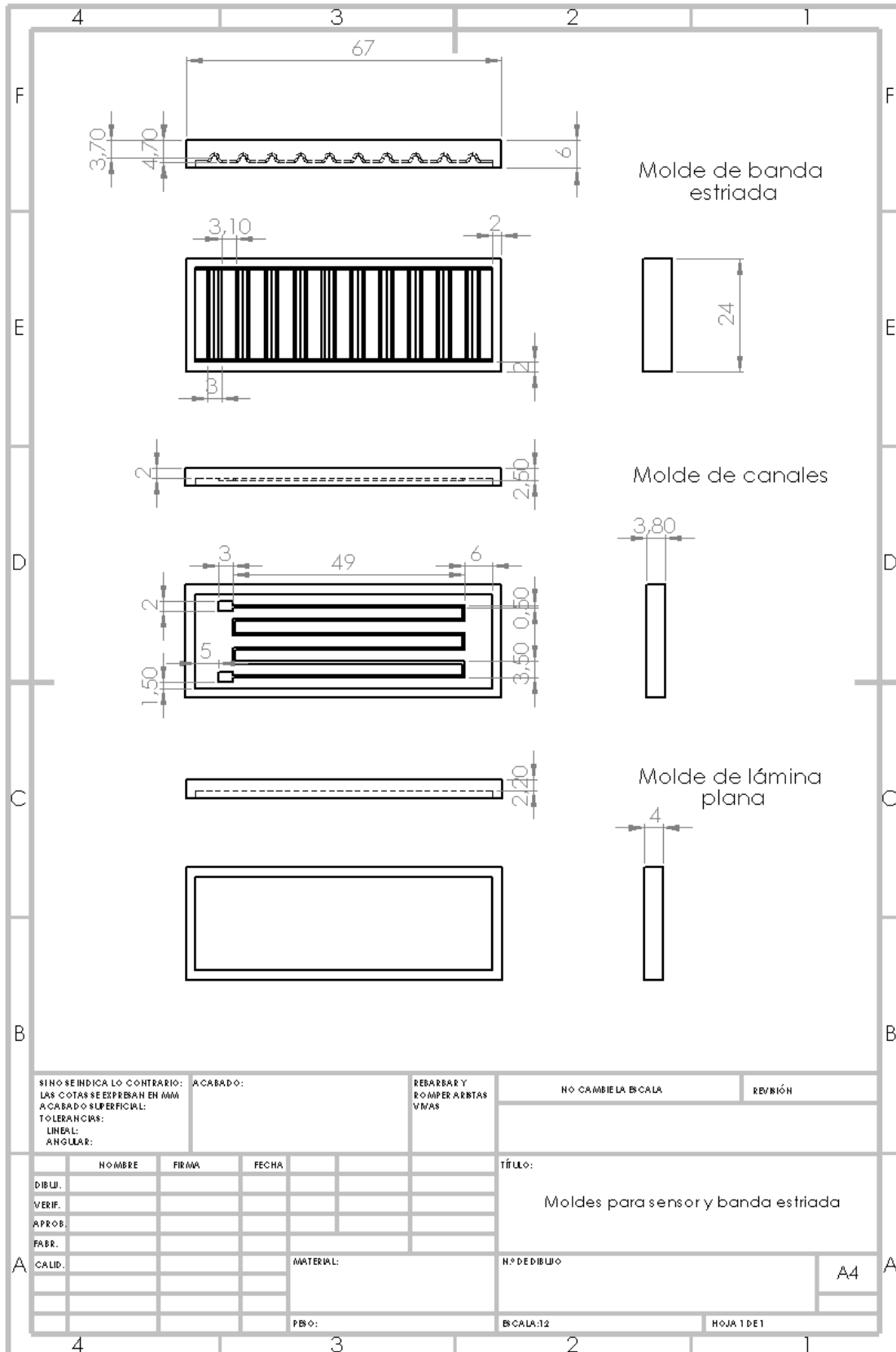
### B.4.1. Actuador axial



## B.4.2. Actuador radial



### B.4.3. Sensor



# Anexo C

## Programa

### C.1. Funciones generadas

#### C.1.1. Funciones generadas

- **actuadores:** Ejecuta el estado de los actuadores.
- **updatesens:** Almacena un nuevo valor en los vectores de datos de acuerdo a la tasa de muestreo fijada.
- **movimiento:** Llama a las funciones que controlan la transición y estados a las componentes en cada fase.
- **promedio:** calcula el valor promedio entre dos ventanas de datos consecutivas en cada vector de datos, almacenándolas variables globales.
- **derivadaprom:** calcula la derivada promedio de las señales mediante los valores promedio de estas calculados con la función promedio y el tiempo transcurrido.
- **mantenercol** y **mantenercab:** Detectan si los actuadores presentan fuga y compensan, mediante un control On/Off con histéresis.
- **emergencia:** Apaga compresores, abre válvulas y reinicia el programa a la fase 1.

Las siguientes funciones controlan la transición a la siguiente fase y asignan estados a las componentes.

- **infcab** e **infcot:** Chequean la condición de contacto en actuadores radiales.
- **dinfcab** e **dinfcot:** Chequean la condición de fin de proceso de desinflado en actuadores radiales.
- **infcue:** Chequea la condición de tiempo durante el inflado del actuador axial.
- **dinfcue:** Chequea la condición de tiempo durante el desinflado del actuador axial.

- **anclarcola:** Fase cero del algoritmo, chequea la condición de contacto en actuador radial trasero.

## C.2. Programa de control

```

1 //declarar estados iniciales de actuadores.
3
4 int statecol = LOW;
5 int statecue = LOW;
6 int statecab = LOW;
7 int statevalcab = LOW;
8 int statevalcue = LOW;
9 int statevalcol = LOW;
11 //declarar parametros de datos.
13 int datacol[100]; // vector de ultimos 100 datos de la cola.
14 int datacab[100]; // vector de ultimos 100 datos de la cabeza.
15 int n = 25; // numero de datos para utilizar en calculos , ultimos n datos del
    vector.
16 v1cola=0; //variables global que almacenan el valor promedio de una ventana de
    datos de tamano n en el actuador de cola.
17 v2cola=0; //ventana consecutiva a v1.
18 v1cabeza=0; // idem al caso anterior
19 v2cabeza=0;
21 //declarar parametros de funcionamiento de algoritmo de contacto.
23
24 float setpointinfcab = 0.7; // v/s
25 float setpointinfcab = 0.6; // v/s
26 float setpointdinfcab = -0.1; // v/s
27 float setpointdinfcol = -0.01; // v/s
28 float histecab = 0.1;
29 float histecol = 0.1 ;
31 //declarar parametros del programa.
33 unsigned long ciclo = 0; // contador de tiempo de cada fase.
34 int fase = 1; // fase del algoritmo de movimiento.
35 int sampler = 1; // sample rate en ms (en realidad , esta variable no controla
    la toma de datos , la tasa utilizada fue de 29 ms)
36 int tinfcuerpo = 2250; // tiempo de inflado de actuador axial.
37 int tdinfcuerpo = 400; // tiempo de desinflad de actuador axial.
38 int ciclos=0; // contador de tiempo para toma de datos;
39 boolean encendido = false;
40 boolean apagado = false;
41 boolean anclaje = true;
43 void setup() { //declarar pines del arduino , 6 salidas digitales para
    compresores y valvulas , dos para LEDs que indican contacto y desinflado , dos
    entradas analogas para sensores.
45 pinMode(5, OUTPUT);
46 pinMode(6, OUTPUT);
47 pinMode(7, OUTPUT);
48 pinMode(8,OUTPUT);

```

```

49 pinMode(9, OUTPUT);
pinMode(10, OUTPUT);
51 pinMode(11, OUTPUT);
pinMode(12, OUTPUT);
53 pinMode(3, INPUT);
pinMode(4, INPUT);
55 pinMode(A0, INPUT);
pinMode(A2, INPUT);
57 Serial.begin(9600);
}
59
void loop() { // el robot se activa y resetea con pulsadores, pero siempre esta
    tomando datos de los sensores.
61
    if(digitalRead(3)==HIGH){
63 encendido=true;
    }
65 if(digitalRead(4)==HIGH){
    apagado=true;
67 }
    if(encendido==true){
69 updatesens();
    actuadores();
71 if(anclaje==true){
    anclarcola();
73 }
    else{
75 movimiento();
    if(apagado==true){
77 emergencia();
    }
79 }
    }
81
    else{
83 updatesens();
    }
85
    }
87
void actuadores(){ //ejecutar estado de actuadores.
89 digitalWrite(7, statecab);
digitalWrite(10, statevalcab);
91 digitalWrite(6, statecue);
digitalWrite(9, statevalcue);
93 digitalWrite(5, statecol);
digitalWrite(8, statevalcol);
95
}

97 void updatesens(){
    if(millis()-ciclos>sampler){ //mueve los datos a la casilla anterior.
99 for (int i=0; i < 99; i++){
    datacab[i]=datacab[i+1];
101 datacol[i]=datacol[i+1];
    }
103 datacol[99] = map(analogRead(A0), 0, 1023, 0, 5000); // guarda un nuevo dato.
    datacab[99] = map(analogRead(A2), 0, 1023, 0, 5000);
105 derivadaprom();
    Serial.print("cabeza ");
107 Serial.println(derivadacabeza, 4);
    Serial.print("cola ");

```

```

109 Serial.println(derivadacola,4); // Actualiza el tiempo del ciclo de toma de
    datos
    ciclos=millis();
111 }
    }
113
114 void movimiento(){ //asigna estados de acuerdo a la fase actual.
115 switch (fase) {
    case 1:
117 infcue();
    mantenercol();
119 break;
    case 2:
121 infcab();
    mantenercol();
123 break;
    case 3:
125 dinfcol();
    mantenercab();
127 break;
    case 4:
129 dinfcue();
    mantenercab();
131 break;
    case 5:
133 infcol();
    mantenercab();
135 break;
    case 6:
137 dinfcab();
    mantenercol();
139 break;
    }
141 }

143 void infcol(){ //infla cola y detecta contacto.
    statecol = HIGH;
145 Serial.println("Inflando cola");
    if(derivadacola>setpointinfcol){ //Detectar contacto
147 Serial.print("Contacto cola");
    statecol=LOW;
149 ciclo = millis();
    fase = 6;
151 for (int i=0; i < 99; i++){
    datacab[i]=datacab[99];
153 }
    }
155 }

157 void infcab(){ //infla cabeza y detecta contacto.
    statecab = HIGH;
159 Serial.println("Inflando cabeza");
    if(derivadacabeza>setpointinfcab){ //Detectar contacto
161 Serial.println("Contacto cabeza");
    statecab = HIGH;
163 ciclo = millis();
    fase = 3;
165 for (int i=0; i < 99; i++){
    datacol[i]=datacol[99];
167 }
    }

```



```

169 }

171 void infcuerpo(){ //infla cuerpo.
statecuerpo = HIGH;
173 Serial.println("Inflando cuerpo");
if(millis()-ciclo>tinfcuerpo){
175 statecuerpo = LOW;
fase = 2;
177 ciclo = millis();

179 }

181 }

183 void dincol(){ //desinfla cola y detecta fin del proceso.
statevalcol = HIGH;
185 statecol= LOW;
Serial.println("Desinflando cola");
187 if(derivadacola<setpointdincol){
statevalcol = LOW;
189 Serial.println("Termina desinflado de cola");
fase = 4;
191 ciclo=millis();
}
193 }

195 void dincuerpo(){ //desinfla cuerpo.
statevalcuerpo = HIGH;
197 Serial.println("Desinflando cuerpo");
if(millis()-ciclo>tincuerpo){
199 statevalcuerpo = LOW;
Serial.println("Termina desinflado cuerpo");
201 ciclo=millis();
fase=5;
203 }
}

205 void dincab(){ //desinfla cabeza y detecta fin del proceso.
statevalcab = HIGH;
207 statecab=LOW;
Serial.print("Desinflando cabeza ");
209 if(derivadacabeza<setpointdincab){
statevalcab = LOW;
211 Serial.println("Termina desinflado de cabeza");
fase = 1;
213 ciclo=millis();
}
215 }

217 void mantenercol(){ //detecta perdida de presion cuando el actuador de cola
esta inflado y compensa.
219 if(derivadacola <-histecol){
Serial.println("Fuga cola");
221 statecol=HIGH;
}
223 if(derivadacola>histecol){
Serial.println("No fuga cola");
225 statecol=LOW;
}
227 }

```

```

229 void mantenercab() { //detecta perdida de presion cuando el actuador de cabeza
    esta inflado y compensa.
    if (derivadacabeza <= histecab) {
231 Serial.println("Fuga cabeza");
    statecab = HIGH;
233 }
    if (derivadacabeza > histecab) {
235 Serial.println("No fuga cabeza");
    statecab = LOW;
237 }
    }
239
    void derivadaprom() { //calcula la derivada promedio, restando el promedio de
        dos ventanas de datos de tamaño n consecutivas en cada vector de datos y
        dividiendo por el intervalo de tiempo de la ventana.
241 prom();
    derivadacabeza = (v2cabeza - v1cabeza) / (float(29 * n * sampler));
243 derivadacola = (v2cola - v1cola) / (float(29 * n * sampler));
    }
245
    void prom() { //calcula el promedio de dos ventanas de datos consecutivas de
        tamaño n para cada vector de datos.
247 v1cola = 0;
    v2cola = 0;
249 v1cabeza = 0;
    v2cabeza = 0;
251 for (int i = 0; i < n; i++) {
    v1cola = v1cola + datacol[99 - 2 * n + i + 1];
253 v2cola = v2cola + datacol[99 - n + i + 1];
    v1cabeza = v1cabeza + datacab[99 - 2 * n + i + 1];
255 v2cabeza = v2cabeza + datacab[99 - n + i + 1];
    }
257 v1cola = float(v1cola / n);
    v2cola = float(v2cola / n);
259 v1cabeza = float(v1cabeza / n);
    v2cabeza = float(v2cabeza / n);
261 }
263
    void emergencia() {
    digitalWrite(7, LOW);
265 digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(6, LOW);
267 digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(5, LOW);
269 digitalWrite(8, HIGH);
    delay(1000);
271 digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
273 digitalWrite(10, LOW);
    resetFunc();
275 }
277
    void resetFunc() {
    fase = 1;
279 encendido = false;
    apagado = false;
281 }
283
    void anclarcola() {
    statecol = HIGH;
285 Serial.println("Inflando cola");

```

```
if(derivadacola>0.2){ //Detectar contacto
287 Serial.print("Contacto cola");
statecol=LOW;
289 ciclo = millis();
fase = 1;
291 anclaje = false;
}
293 }
```