

# Generacion de patrones de marcha para soft robot caminante



Ángela Serrano Curiel

Departamento de Automática, Ingeniería Eléctrica, Electrónica e Informática  
Industrial

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales - UPM

*Trabajo de Fin de Grado*

Dirigido por Antonio Barrientos

Julio 2016



## Resumen

Los avances en el mundo de la robótica en los últimos años han dotado a los humanos de gran comodidad, seguridad y eficiencia, tanto en un ámbito laboral como personal. Entre estos avances, desde aproximadamente el año 2010 ha surgido una nueva vertiente de la robótica, conocida como robótica flexible o *soft robotics*.

Este trabajo tiene como principal objetivo el diseño, fabricación y control de un robot flexible fabricado con silicona capaz de llevar a cabo de forma eficiente una serie de secuencias de marcha. Esta eficiencia se pretende conseguir mediante la deformación controlada del robot, mediante accionamiento neumático y realimentación de la flexión conseguida.

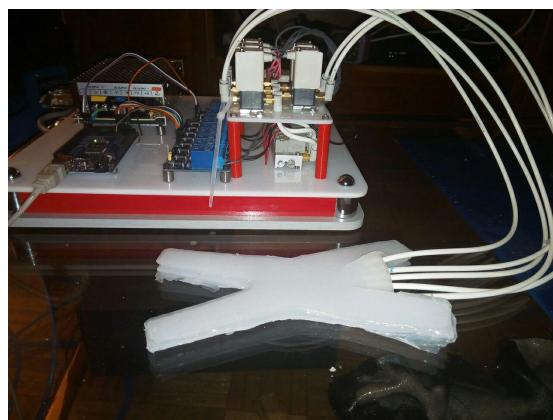
Los *soft robots* dan nombre a un conjunto de sistemas inspirados en animales sin esqueleto, como son gusanos, estrellas de mar o pulpos, cuya principal característica es la deformación que son capaces de alcanzar, recuperando posteriormente su forma de partida.

Esta deformación se debe a las propiedades de los materiales con que están construidos. Un ejemplo de estos son los nuevos materiales inteligentes capaces de recuperar una forma memorizada cuando son sometidos ante estímulos eléctricos, químicos, térmicos, etc... Estos materiales son, por ejemplo, el SMA o el SMP, entre otros.

Otro ejemplo es el utilizado en este trabajo: silicona, un material capaz de adquirir las deformaciones que caracterizan a estos nuevos robots. Este material, sin embargo, no ofrece ninguna propiedad *“inteligente”*. Son, por tanto, normalmente utilizados mediante accionamiento neumático, como es el caso de el presente proyecto.

El desarrollo de este trabajo pretende llevar a cabo un robot flexible con cinco cámaras fabricado por moldeo. Estas cámaras, al ser injectado aire a presión proveniente de un compresor, se deformarán de acuerdo con el diseño y método de fabricación seguido.

Este robot ha de llevar a cabo una serie de secuencias de marcha, ordenadas por el usuario a través de una interfaz gráfica desarrollada en Matlab, a través de la carga controlada de sus cámaras. Este control se lleva a cabo mediante válvulas accionadas por relés, controlados, a su vez por Matlab a través de una Arduino Mega, tal y como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1: Estación de trabajo y robot, en su versión de cadena abierta**

A fin de lograr este objetivo, se requiere de una reflexión que permita la comprensión de la complejidad de control del prototipo. Conviene tener en consideración las disconformidades entre la robótica rígida y la flexible, ya que, esta última, se podría considerar que tiene infinitas articulaciones, lo que dificulta significativamente su control.

Es debido al carácter de novedad de esta robótica, así como a la complejidad previamente comentada de control y modelado, que la existencia de simuladores que faciliten el dimensionamiento y diseño del dispositivo es limitada.

Pero aun existiendo simuladores capaces de reflejar con cierto realismo el comportamiento del robot y de este modo poder prevenir ciertos errores facilitando su supresión previa a los procesos de diseño y fabricación del

modelo, la experiencia juega un papel de notable importancia, resultando suficiente para el modelado del robot.

Son, por tanto, los ensayos y la experimentación lo que ha permitido desarrollar un modelo efectivo en este trabajo. Sin embargo, debido al carácter difícilmente repetitivo de la fabricación, y a algunos problemas de compleja subsanación, la repetición del proceso de diseño y fabricación ha estado presente a lo largo de todo el proyecto.

Este diseño se lleva a cabo a través del programa CAD Inventor, procurando el modelo del robot deseado, a partir del cual se desarrolla el molde que permitiría su conformación. Una vez diseñado éste, se obtiene a partir de una impresora 3D, y se procede a su fabricación.

A lo largo de todo el proyecto se ha perfeccionado tanto el diseño como la fabricación, mediante el ensayo de distintos prototipos fabricados con un molde diseñado, de los cuales se han realizado hasta cuatro. Entre los problemas de diseño y fabricación que se han solventado se citan los más problemáticos, entre la gran cantidad de ellos que han sucedido:

- Falta de homogeneidad en las cámaras. Implica el cambio de impresora, de imprimir en cama caliente con ABS se da lugar a imprimir en cama fría con PLA para evitar la contracción.
- Falta de estanqueidad. Se diseña una extensión en el robot que permite la introducción estanca de todos ellos.
- Deformación ineficiente. Se posiciona una malla en una parte del robot a fin de dar rigidez a dicha superficie y así optimizar la deformación.

Acorde con estas medidas, finalmente los procesos de diseño y fabricación consiguen un robot ligero, flexible y eficiente.

Como se ha expresado previamente, el control de los modos de marcha se lleva a cabo a través de unas válvulas que permiten, o no, la inyección de aire proveniente de un compresor.

Conviene señalar que este proyecto proviene de un trabajo realizado el curso 2014-2015 (1), que concluyó siendo capaz de realizar las secuencias de

marcha en cadena abierta. Este trabajo pretende ir más allá, incorporando sensores al robot que permitan su control en cadena cerrada.

En el trabajo previo se contaba con válvulas 3/2, capaces de inyectar o expulsar aire, pero no de mantenerlo. A fin de lograr este estado, que permita el mayor gobierno del robot, se adquieren unas válvulas 2/2 que, colocadas en serie con las válvulas 3/2 permitan conseguir los tres estados. Es necesaria, a su vez, la adquisición de los relés que las accionan.

El limitado control existente en robots flexibles en la bibliografía se lleva a cabo, en el caso de robots de accionamiento neumático, mediante sensores de presión, volumen o deformación. En este caso, se opta por un sensor de flexión, capaz de suministrar la medida de la deformación de las patas.

Es necesario estudiar el empleo de los sensores de flexión e integración en el sistema, lo que se lleva a cabo de forma detallada. Para su empleo, se llega a la incorporación de un divisor de tensión, con resistencias de  $22\ k\Omega$  para maximizar la sensibilidad de la lectura.

En cuanto a la integración, se concluye en la utilidad de la incorporación de un sistema microcontrolador embebido al robot, encargado de la lectura de los sensores y de la transmisión a la unidad de mando de la medida tomada, mediante protocolo I2C.

La unidad de mando consiste en un ordenador, en concreto, el programa Matlab R2015b, comunicado con un microcontrolador Arduino Mega 2560 a través del puerto serie. Es en Matlab donde se ejecuta el programa de control del robot, sirviendo la Arduino Mega como tarjeta de adquisición.

En Matlab se ha desarrollado una interfaz gráfica que permita el manejo sencillo del robot por parte del usuario, a través de la selección del modo de marcha que se desea llevar a cabo. También es útil para realizar los experimentos y ensayos, gracias a los modos de chequeo con los que cuenta, así como para caracterizar al robot, mediante la calibración de los sensores implementados en un prototipo determinado llevada a cabo por otro de sus modos. Esta calibración es necesaria debido a la variación de parámetros incontrolables en el método de fabricación, tales como la cantidad de silicona vertida, o la formación de la mezcla de la silicona.

Es también en Matlab donde se desarrolla el control del robot, tanto en cadena abierta como en cadena cerrada. El primero es sencillo, pero produce falta de coordinación entre las cámaras, coordinación necesaria para llevar a cabo determinados modos de marcha, tal como el caminante.

El control en cadena cerrada se lleva a cabo mediante estados discretos, calibrados previamente de forma cualitativa en cada cámara: 0 (vacía), 1 (casi vacía), 2 (intermedia), 3 (casi llena) y 4 (llena).

Estos estados permiten la ejecución de los modos de marcha, programados mediante tablas que definen la secuencia que debe seguir cada cámara. De esta forma, para asegurar la completa coordinación entre las cámaras, no se procederá a la siguiente etapa de la secuencia hasta no haber alcanzado todas las cámaras el estado deseado.

Con este método de control se consigue el desarrollo de las secuencias de marcha de modo más sincronizado y eficiente, especialmente la secuencia caminante, cuya falta de coordinación en el control realimentado hace de su ejecución un modo de marcha significativamente ineficiente.

Los ensayos realizados demuestran, pues, un aumento notable de eficiencia en la ejecución de los modos de marcha mediante el control realimentado con respecto al control en lazo abierto.

Con todo lo expuesto previamente, se logran los objetivos de partida, puesto que:

- Se ha conseguido mejorar el robot de partida mediante la incorporación de un nuevo material, que aporta rigidez a la parte del prototipo que no ha de deformarse, y la mejora del método de fabricación, así como mejorar su eficacia a través de un nuevo diseño.
- Se ha logrado incorporar la realimentación al sistema, utilizando, para ello, un sistema embebido que permite la distribución de tareas del sistema.
- Se concluye el trabajo con una ejecución más efectiva de los modos de marcha existentes utilizando el control en cadena cerrada.

## **Agradecimientos**

Para empezar, me gustaría agradecer a Antonio el haberme brindado la oportunidad de realizar este trabajo y por la atención y ayuda prestada.

Así mismo, doy las gracias a los amigos, por sus ánimos y por estar ahí en cualquier momento. En concreto, a Virginia y a Mario por soportar mi notable ausencia en estos cuatro años, y apoyarme ante todo.

Me gustaría hacer un agradecimiento a la asociación de estudiantes Reset, por su labor y consejos, por permitirme hacer uso de la impresora para llevar a cabo este trabajo, así como por confiar en el préstamo del compresor.

Por último, le agradezco a mi familia el apoyo y ayuda recibida, en todos los aspectos de mi vida, que me han llevado a estar dónde estoy y por sus ánimos en los momentos difíciles.

# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Cuadros</b>	<b>xI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	3
1.2. Estado actual . . . . .	3
1.3. Objetivo del trabajo de fin de grado . . . . .	4
1.4. Aportaciones propias . . . . .	5
1.5. Estructura de la memoria . . . . .	6
<b>2. Estado del arte</b>	<b>7</b>
2.1. Materiales de construcción . . . . .	8
2.1.1. Materiales con memoria de forma . . . . .	8
2.1.2. Polímeros electroactivos . . . . .	10
2.1.3. Caucho de silicona . . . . .	10
2.2. Control de <i>soft robots</i> . . . . .	11

## **ÍNDICE GENERAL**

---

2.2.1. Modelado . . . . .	11
2.2.2. Realimentación . . . . .	12
2.2.3. Métodos de control . . . . .	13
2.3. Aplicaciones . . . . .	15
<b>3. Diseño y fabricación</b>	<b>18</b>
3.1. Diseño y fabricación del modelo . . . . .	19
3.1.1. Primer diseño . . . . .	23
3.1.1.1. Diseño . . . . .	23
3.1.1.2. Fabricación . . . . .	25
3.1.1.3. Ensayos y conclusiones . . . . .	25
3.1.2. Segundo diseño . . . . .	27
3.1.2.1. Diseño . . . . .	27
3.1.2.2. Fabricación . . . . .	28
3.1.2.3. Ensayos y conclusiones . . . . .	31
3.1.3. Tercer diseño . . . . .	34
3.1.3.1. Diseño . . . . .	34
3.1.3.2. Fabricación . . . . .	36
3.1.3.3. Ensayos y conclusiones . . . . .	37
3.1.4. Cuarto diseño . . . . .	38
3.1.4.1. Diseño . . . . .	38
3.1.4.2. Fabricación . . . . .	39

## **ÍNDICE GENERAL**

---

3.1.4.3. Ensayos y conclusiones . . . . .	39
3.2. Implementación del sistema embebido . . . . .	43
3.3. Diseño y fabricación de la estación de trabajo . . . . .	45
<b>4. Arquitectura Hardware y Software</b>	<b>48</b>
4.1. Selección de componentes electrónicos y neumáticos . . . . .	48
4.1.1. Componentes de partida . . . . .	49
4.1.2. Requisitos de los nuevos componenetes . . . . .	50
4.1.2.1. Requisitos neumáticos . . . . .	50
4.1.2.2. Requisitos eléctricos . . . . .	51
4.1.2.3. Requisitos adicionales . . . . .	51
4.1.3. Selección de los nuevos componenetes . . . . .	51
4.1.3.1. Componentes del circuito neumático . . . . .	52
4.1.3.2. Componentes Hardware . . . . .	53
4.2. Arquitectura Software. . . . .	59
4.2.1. Distribución de tareas . . . . .	59
4.2.1.1. Arduino Pro Mini . . . . .	59
4.2.1.2. Arduino Mega 2560 . . . . .	59
4.2.1.3. Matlab R2015b . . . . .	60
4.2.2. Interfaz gráfica . . . . .	60
4.2.3. Diseño de clases . . . . .	64
4.2.4. Comunicación . . . . .	66

---

## ÍNDICE GENERAL

<b>5. Control</b>	<b>68</b>
5.1. Modos de marcha . . . . .	68
5.1.1. Test . . . . .	69
5.1.2. Caminante . . . . .	70
5.1.3. Ondulante . . . . .	71
5.2. Control . . . . .	73
5.2.1. Control en cadena abierta . . . . .	74
5.2.2. Control en cadena cerrada . . . . .	76
<b>6. Planificación y presupuesto</b>	<b>78</b>
6.1. Estructura y descomposición del proyecto . . . . .	79
6.2. Diagrama de Gantt . . . . .	81
6.3. Presupuesto . . . . .	82
<b>7. Experimentos y resultados</b>	<b>85</b>
7.1. Ensayos . . . . .	85
7.1.1. Metodología de ensayo . . . . .	86
7.1.2. Ensayos del modo de marcha ondulante . . . . .	87
7.1.2.1. Control en cadena abierta . . . . .	87
7.1.2.2. Control en cadena cerrada . . . . .	89
7.1.3. Ensayos del modo de marcha caminante . . . . .	90
7.2. Análisis de los resultados . . . . .	90
<b>8. Conclusiones y trabajos futuros.</b>	<b>92</b>

## **ÍNDICE GENERAL**

---

8.1. Conclusiones . . . . .	93
8.2. Líneas futuras . . . . .	94
8.3. Impactos y responsabilidad legal, ética y laboral . . . . .	95
<b>Bibliografía</b>	<b>98</b>

# Índice de figuras

1.	Estación de trabajo y robot, en su versión de cadena abierta . . . . .	IV
1.1.	Soft robot de partida . . . . .	4
2.1.	Cadena cinemática rígida . . . . .	7
2.2.	Funcionamiento de las aleaciones con memoria de forma . . . . .	9
2.3.	Meso-scale: robot fabricado con SMP . . . . .	9
2.4.	Funcionamiento de los polímeros electroactivos . . . . .	10
2.5.	Análisis de elementos finitos . . . . .	12
2.6.	Ejemplos de electrónica flexible . . . . .	14
2.7.	Control de múltiples válvulas . . . . .	15
2.8.	Soft robot actuando como gripper . . . . .	16
2.9.	Nano robot flexible de la universidad de Oyakama . . . . .	17
3.1.	Robot de partida . . . . .	18
3.2.	Proceso de fabricación . . . . .	19
3.3.	Sección de conductos de aire . . . . .	21
3.4.	Segundo Paso del proceso de fabricación . . . . .	22

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

---

3.5. Orientación de los sensores . . . . .	23
3.6. Diseño del primer modelo . . . . .	24
3.7. Ensayos con el primer modelo . . . . .	26
3.8. Segundo modelo . . . . .	27
3.9. Cuerpo del prototipo al posicionar una tabla lastrada sobre el molde en la fase de curado . . . . .	29
3.10. Sensor de flexión . . . . .	30
3.11. Robot con sensores . . . . .	32
3.12. Ensayo de contracción . . . . .	32
3.13. Pruebas con el segundo diseño . . . . .	33
3.14. Diseño de aletas en el molde . . . . .	34
3.15. Tercer diseño . . . . .	36
3.16. Implementación de los sensores . . . . .	36
3.17. Llenado no deseado de las cámaras . . . . .	37
3.18. Cuarto diseño . . . . .	38
3.19. Deformación plástica de las cámaras . . . . .	40
3.20. Llenado de las cámaras empleando una capa de deformación de espesor reducido . . . . .	41
3.21. Deformación eficiente de las cámaras . . . . .	42
3.22. Vertido de silicona en los moldes superior e inferior . . . . .	42
3.23. Fijación de la malla y los sensores al robot . . . . .	43
3.24. Sistema embebido . . . . .	45

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

---

3.25. Estación de trabajo de partida . . . . .	45
3.26. Soporte de las válvulas 2/2 . . . . .	46
3.27. Estación de trabajo completa . . . . .	47
4.1. Componentes de partida . . . . .	50
4.2. Válvula VDW20BZ1D . . . . .	53
4.3. Circuito neumático . . . . .	54
4.4. Módulo de relés . . . . .	55
4.5. Arduino Pro Mini . . . . .	55
4.6. Esquema de conexiones de los sensores . . . . .	56
4.7. Esquema del circuito electrónico . . . . .	58
4.8. Método calibración de la interfaz gráfica . . . . .	62
4.9. Método de funcionamiento continuo de la interfaz gráfica . . . . .	62
4.10. Método funcionamiento discreto de la interfaz gráfica . . . . .	63
4.11. Diagrama URL de las clases de la programación . . . . .	65
4.12. Comunicación entre los subsistemas . . . . .	67
5.1. Referencia numérica de las cámaras del robot . . . . .	69
5.2. Representación gráfica de la secuencia test . . . . .	70
5.3. Representación gráfica de la secuencia caminante . . . . .	72
5.4. Representación gráfica de la secuencia ondulante . . . . .	73
5.5. Diagrama de flujo del control en cadena abierta . . . . .	75
6.1. Estructura y descomposición del proyecto . . . . .	80

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

---

6.2. Diagrama de Gantt . . . . .	82
7.1. Resultados del ensayo del modo ondulante en cadena abierta . . . . .	88
7.2. Resultados del ensayo del modo ondulante en cadena cerrada . . . . .	89

# Índice de Cuadros

3.1. Valor de la resistencia del sensor de flexión . . . . .	30
4.1. Requisitos de los componentes Hardware . . . . .	52
6.1. Presupuesto . . . . .	83
7.1. Resultados de modo ondulante en cadena abierta . . . . .	88
7.2. Resultados de modo ondulante en cadena abierta . . . . .	89

# 1

## Introducción

La robótica, cuyo origen se remonta aproximadamente medio siglo, ha contribuido desde su aparición tanto en el ámbito laboral, mediante, entre otros, la realización de tareas repetitivas, la disminución de costes de fabricación o el aumento de seguridad en el entorno de trabajo, al serles encomendadas las tareas más peligrosas; como en el doméstico, por ejemplo, con la asistencia en limpieza, la percepción de un sentimiento de compañía o la aparición de nuevos tratamientos terapéuticos (2).

Con el desarrollo tecnológico en el que estamos inmersos, cabía esperar que aparecieran ramas tecnológicas que rompieran los pilares sobre los que se había sostenido la robótica tradicional: una cadena cinemática rígida.

En esta tradicional robótica se han logrado técnicas de control que han permitido cumplir con las exigencias tanto de la industria (gran precisión y velocidad), como de los entornos domésticos, donde no es necesaria gran velocidad como sí lo es la precisión, y, cada vez más, la interacción con el ser humano.

Charles Darwin formuló su teoría acerca del fenómeno denominado *selección natural*, basado en la capacidad de la naturaleza para elegir a los seres vivos que deben sobrevivir: los más fuertes, aquellos con capacidad de adaptación al hábitat. Acorde con esta filosofía, los investigadores de la robótica moderna han centrado su interés en determinadas especies: aquellas que carecieran de esqueleto.

---

Los *soft robots* están bio-inspirados por organismos de la naturaleza, blandos o flexibles. La naturaleza, por su condición selectiva, se ha encargado de la optimización de la locomoción de estos seres vivos durante miles de años, por lo que resulta lógico abordar este ámbito.

Los *soft robots* son sistemas con infinitos grados de libertad de naturaleza flexible, cuya capacidad de deformación constituye la base de su funcionamiento.

Tradicionalmente los robots consisten en un sistema rígido con la capacidad de alcanzar los puntos del espacio que sus grados de libertad y disposición les permiten, limitando el espacio de trabajo y, en ocasiones, provocando gastos económicos en nuevos actuadores para proporcionar grados de libertad recurrentes.

En contraposición, aparecen los robots flexibles, cuyos infinitos grados de libertad les dotan de mayor accesibilidad sin necesidad de aumentar el gasto en recursos para nuevos actuadores. E, incluso, pueden agarrar objetos de forma más *natural*, esto es, envolviéndolos y adoptando la forma del objeto en cuestión.

Además, de la naturaleza de los materiales empleados surge la disminución de la facilidad de rotura de estos robots, dado que absorben la energía de los posibles golpes, lo que, a su vez, les hace más seguros de cara a la interacción con los seres humanos.

La necesidad de incorporación de sistemas de seguridad que procuren la absorción de los posibles impactos con los usuarios, propia de la robótica tradicional, viene inherente en los robots flexibles, siendo, de nuevo, favorable económicoamente. Modificar su posición o corregir su actuación mientras están actuando no resulta peligroso.

El transporte es también uno de los aspectos en los que se supera a la robótica rígida. La sencillez de sus estructuras y el escaso peso de los materiales que los constituyen permiten la obtención de un robot ligero y fácil de transportar.

El término *soft robot* engloba distintos tipos de sistemas deformables, entre los que se encuentran los caminantes, que constituye el tipo de robot que se ha desarrollado en este proyecto.

Este trabajo recorre el diseño y fabricación de un *soft robot caminante*, detallado en el capítulo **Diseño y fabricación**; la adquisición de los componentes físicos necesarios

para su movimiento y el desarrollo del software, explicado en el capítulo **Arquitectura Hardware y Software** y el desarrollo de las técnicas de control necesarias para llevar a cabo la ejecución de distintas secuencias de marcha, contemplado en el capítulo **Control**.

### 1.1. Motivación

El escaso tiempo de vida de la robótica flexible, menor a los diez años, conlleva la ausencia de bibliografía en determinados aspectos de los mismos, como ocurre con las técnicas de control.

Esta rama de la robótica está en fase de desarrollo e investigación, lo que implica por definición la existencia de numerosas preguntas sin respuesta y necesidad de recursos para abordarlas.

Este trabajo se plantea como una oportunidad para abordar dichos aspectos desconocidos o poco investigados. El análisis e implantación del control con realimentación en un *soft robot* supone, por tanto, la principal premisa que ha de abordar el proyecto.

En el curso 2014-2015, se desarrolló en el departamento de Automática y Robótica Industrial un Trabajo de Fin de Grado, *Desarrollo y control de un soft-robot caminante con accionamiento neumático* (1). En él, su autor estudió y desarrolló el diseño mecánico de un robot flexible caminante, logrando un sistema ligero y fácil de operar con el que logró llevar a cabo secuencias de marcha en cadena abierta.

Es por ello que este trabajo de investigación pretende avanzar en este prototipo, desarrollando un robot flexible capaz de ser controlado de forma eficiente.

### 1.2. Estado actual

Como se ha mencionado previamente, este trabajo sucede a un proyecto llevado a cabo durante el curso 2014-2015 (1) consistente en el desarrollo de un robot flexible capaz de realizar secuencias de marcha en cadena abierta.

### **1.3 Objetivo del trabajo de fin de grado**

En el diseño mecánico realizado, los tubos empleados en la inyección de aire no se introducían por la misma sección, sino perpendicularmente a cada cámara, y, por tanto, a la dirección de marcha, facilitando las pérdidas de aire por insuficiente estanqueidad y la disminución de movilidad del prototipo.

En el desarrollo de aquel trabajo, se construyó un banco de trabajo, formado por los elementos electrónicos y neumáticos necesarios para conseguir el movimiento del robot. Entre otros componentes, se constituía por válvulas 3/2, cuya funcionalidad imposibilita el alcance de un estado en el cual el aire se mantuviera en el interior de las cámaras, necesario para realizar marchas de forma más eficiente.

La ausencia de sensores impedía realizar las marchas de un modo no basado en predicciones temporales, lo que implicó el estudio y la optimización caudal-presión-tiempo para conseguir la deformación de las cámaras y el movimiento del robot deseados.

En la Figura 1.1 se muestra el robot construido en este proyecto, así como la estación de funcionamiento. Se puede apreciar la entrada de los tubos perpendicular a la dirección de movimiento.



**Figura 1.1: Soft robot de partida** Incluye la estación de funcionamiento.

### **1.3. Objetivo del trabajo de fin de grado**

Los objetivos marcados en el comienzo del proyecto se concentran en las siguientes premisas:

## **1.4 Aportaciones propias**

---

- **Rediseño del modelo.** Estudio y elaboración de las posibles mejoras mecánicas del robot existente.
- **Ampliación de la estación de funcionamiento.** Incorporación de nuevas válvulas y relés que permitan el mantenimiento del aire en el interior de las cámaras.
- **Realimentación.** Incorporación de sensores en las cámaras del robot que permitan cerrar el lazo de control.
- **Embarcación.** Incorporación de un sistema que lea los sensores y se lo transmita a la unidad de mando.
- **Programación de los modos de marcha.** Desarrollo de una interfaz y la algoritmia necesaria para permitir al robot caminar de distintas formas, controlándolo con la lectura de los sensores.

### **1.4. Aportaciones propias**

- La incorporación de los tubos de forma lateral del diseño de partida supone inconvenientes de cara a la estanqueidad y a la efectividad del movimiento. Acorde con este planteamiento, se ha diseñado un modelo que permita la incorporación de todos ellos en la dirección de la marcha del robot.
- La elección de la forma de disposición del sistema embarcado en el robot se ha pensado detalladamente, llegando a la conclusión de que, sobre los tubos de entrada de aire es el lugar con menor número de inconvenientes para efectuar los movimientos.
- La incorporación de los sensores flexibles, para medir deformación, suponía la necesidad de resistencias para realizar un divisor de tensión. Surgió el problema de su localización y definición, puesto que incrustadas en la silicona podían rasgarla y, al aire, la dificultad de la soldadura implicaba un inconveniente.

Finalmente, se ha decidido localizar, sobre los tubos de entrada, una placa junto con la Arduino Pro Mini utilizada. En cuanto al valor de las resistencias utilizado,

se realizó una optimización de la sensibilidad del sensor, llegando a la conclusión de que la mejor opción era de  $22\text{k}\Omega$ .

- Se han analizado minuciosamente las válvulas a utilizar y la forma de colocarlas, lidiando con la dificultad de la falta de espacio en la estación existente y la necesidad de unos conductos de entrada específicos.

### 1.5. Estructura de la memoria

Este documento engloba las etapas de desarrollo del *soft robot*. En primer lugar, se realiza un breve resumen del Estado del Arte en el capítulo 2, **Estado del arte**, donde se describen las características de este tipo de robot, junto con sus aplicaciones y ejemplos más relevantes, y el estado de las técnicas de control para estos sistemas.

A continuación, se describe el desarrollo del trabajo en los capítulos 3, 4 y 5, donde se exponen al detalle los planteamientos perseguidos en la realización del proyecto, así como los obstáculos hallados y las soluciones llevadas a cabo, junto con los motivos que las sustentan.

En el capítulo 7, **Experimentos y resultados**, se recogen las conclusiones a las que se ha llegado y las posibles líneas de desarrollo para trabajos futuros que supongan la mejora de la funcionalidad del robot.

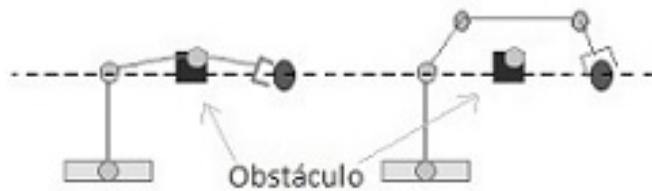
Finalmente, se detallan los recursos y organización empleados en el desarrollo del trabajo en el capítulo 6, **Planificación y presupuesto**.

## 2

# Estado del arte

Tradicionalmente, los robots consisten en una cadena cinemática de eslabones rígidos unidos entre sí mediante articulaciones, relacionadas directamente con los grados de libertad del robot, que les permiten propagar un determinado movimiento ante la respuesta de los actuadores. Los grados de libertad mencionados impondrán el espacio de trabajo del robot.

En la Figura 2.1 se muestra como una articulación adicional permite ampliar el campo de trabajo de un robot.



**Figura 2.1: Cadena cinemática rígida.** A la derecha aparece el robot con un grado de libertad redundante que le permite mayor movilidad.

La precisión y la complejidad de las tareas y movimientos que un determinado mecanismo es capaz de llevar a cabo vienen condicionados por el número de articulaciones y la calidad de los actuadores, lo que incitaría al deseo de la partición de estas estructuras rígidas, división que no sólo se traduce en costes y complejidad de control, sino que resulta imposible de llevar a la práctica en algunas ocasiones.

## **2.1 Materiales de construcción**

---

En el capítulo de **Introducción** ha quedado expuesto que, en los últimos años se ha desarrollado una nueva vertiente de la robótica. Aparece la robótica flexible, capaz de responder ante medios impredecibles y con un número de grados de libertad teóricamente infinito.

Los movimientos que estos robots son capaces de llevar a cabo vienen determinados por las propiedades de los materiales seleccionados para su construcción, así como por el método de fabricación empleado.

### **2.1. Materiales de construcción**

Derivado de la características implícitas en este tipo de robots se deduce el tipo de materiales empleados en su construcción: elásticos y con capacidad de absorción de energía elevada.

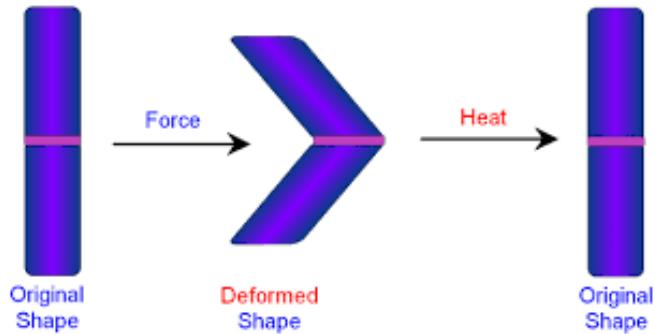
Conviene hacer un estudio acerca de los tipos de materiales más utilizados en la construcción de estos tipos de robots (3). Entre otros criterios de clasificación, en función de las características de los diferentes materiales, se encuentran los siguientes:

#### **2.1.1. Materiales con memoria de forma**

Como su propio nombre sugiere, son capaces de recordar y recuperar una determinada forma mediante estímulos térmicos, químicos o luminosos, entre otros. Los materiales con memoria de forma más utilizados son aleaciones (SMA) y polímeros (SMP).

##### **- Aleaciones con memoria de forma, SMA (Shape Memory Alloy).**

La física de estos materiales se basa en la presencia de dos fases: martensítica, a bajas temperaturas, en la cual el material es más maleable, y la austenítica, a altas temperaturas. En la transformación entre ambas se produce un cambio de densidad, conllevando un cambio de forma. En la Figura 2.3 se ilustra este principio de funcionamiento.



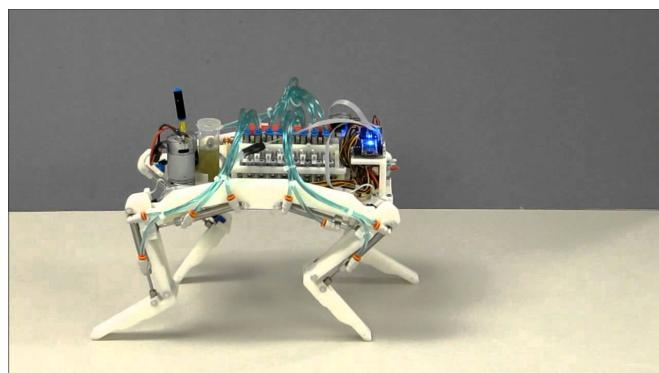
**Figura 2.2:** Funcionamiento de las aleaciones con memoria de forma

Actualmente hay gran cantidad de robots desarrollados con este tipo de materiales. Un ejemplo es el *Meshworm*, realizado por investigadores de la Universidad de Harvard y la Universidad Nacional de Seúl (4).

- **Polímeros con memoria de forma, SMP (Shape Memory Polymers).**

Son similares a los SMA, pero están compuestos por polímeros activos que permiten la recuperación de la forma memorizada a través de estímulos externos, no necesariamente térmicos (eléctricos, magnéticos, químicos, etc.).

Un ejemplo de robot fabricado con polímeros con memoria de forma es el Meso-scale (5), cuya apariencia se muestra en la ??.

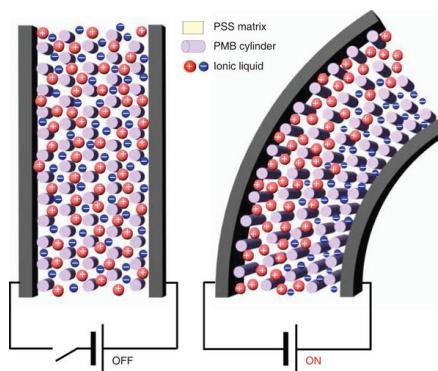


**Figura 2.3:** Meso-scale La presencia de materiales SMP en su cuerpo le permite la flexión de las patas.

### 2.1.2. Polímeros electroactivos

Los polímeros electroactivos (EAP) presentan un cambio de tamaño o de forma ante el sometimiento a un estímulo eléctrico.

Su principio de funcionamiento es sencillo: al aplicar un campo eléctrico se produce un gradiente dimensional en la capa polimérica que provoca la deformación del material, como se ilustra en la Figura 2.4.



**Figura 2.4: Funcionamiento de los polímeros electroactivos.** Al aplicar un campo eléctrico se produce un gradiente que causa la deformación del material.

Este material es ampliamente utilizado en la robótica, tanto en la generación de músculos artificiales, como en el desarrollo de sensores y actuadores (6).

### 2.1.3. Caucho de silicona

Este material es un polímero elástomero capaz de soportar elevadas deformaciones y recuperar, tras dejar de ser sometido a dichos esfuerzos, la forma de reposo.

Por sus propiedades es uno de los materiales más utilizados en la robótica flexible. Es, de hecho, el material a partir del cual se ha desarrollado el robot de este proyecto.

Los actuadores empleados para robots fabricados con este tipo de material son neumáticos, permitiendo el llenado de cavidades internas al robot y, para así efectuar la deformación del mismo.

El empleo de este material en *soft robots* generalmente implica el uso del moldeo.

Un ejemplo de robot fabricado con este material es el desarrollado por investigadores de Harvard, inspirador de este proyecto (7).

## 2.2. Control de *soft robots*

Una diferencia fundamental entre la robótica tradicional y la flexible es el número de articulaciones, infinito en el caso de los últimos, lo que hace que la actuación y el control de sus movimientos sean complejos.

En este tipo de robots se emplean distintas técnicas en aras de lograr el movimiento deseado. A continuación se describen las más importantes en relación con el modelado y realimentación.

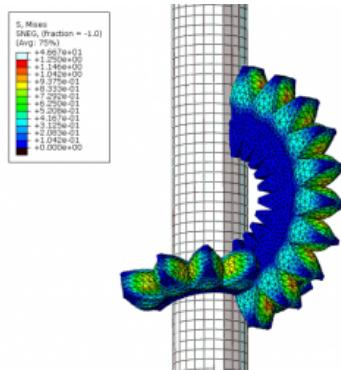
### 2.2.1. Modelado

En los *soft robots* se carece de una cadena cinemática rígida, que permita realizar la cinemática directa e inversa exacta para conocer de forma teórica la relación exacta entre la actuación y la respuesta del robot. Debido a esta carencia, es necesario realizar una estimación que permita conocer de forma aproximada dicha relación.

Para realizar dicha aproximación, la técnica más conocida es el método de elementos finitos, FEM (Finite Element Method) (8). Permite la resolución de ecuaciones diferenciales, si bien necesita de la identificación de condiciones de contorno espacio-temporales.

Es uno de los métodos más utilizados para resolver este tipo de problemas, permitiendo simular el movimiento y deformación de estos materiales una vez impuestas una serie de restricciones. Un ejemplo de ello es el mostrado en la Figura 2.5.

Debido a la gran diversidad de propiedades y características de los materiales empleados, es posible que el programa utilizado carezca del material de interés o que sea necesario definir un nuevo material, para lo que habrá que definir una serie de propiedades, como son el módulo de elasticidad o el coeficiente de Poisson, entre otros.



**Figura 2.5: Análisis de elementos finitos (8).**

Los robots flexibles carecen de un modelo cinemático exacto debido a sus propiedades de deformación continua y compleja. Los investigadores de los *soft robots* en ocasiones emplean un modelo cinemático basado en la simplificación del movimiento del sistema asumiendo una curvatura constante (piecewise constant curvature, PCC) (9).

La cinemática inversa es todavía más complicada. El hecho de tener infinitos grados de libertad hace que las posibles combinaciones de movimientos que lleven a una determinada posición sean infinitas, lo que implica que la planificación más efectiva de movimientos sea muy compleja computacionalmente.

### 2.2.2. Realimentación

Una vez modelado el sistema, y debido al número infinito de grados de libertad, las soluciones dadas por las diferentes técnicas (elementos finitos u otras), serán en general complejas y su implementación necesitará de simplificaciones.

Además, dichas soluciones en general no serán exactas y normalmente el robot flexible no va a efectuar los movimientos como se desea. La experiencia será de destacada importancia en el correcto funcionamiento del mismo, permitiendo ajustar los parámetros de las actuaciones para que la respuesta del sistema sea lo más parecida posible a la deseada.

Muchas aplicaciones, por simplicidad, no van más allá de esto, es decir, se quedan

en un control en cadena abierta (7).

Sin embargo, el cierre del bucle supondría un avance absoluto en la aplicación, permitiendo aprovechar las ventajas explicadas en el capítulo de **Introducción**, como son la adaptabilidad al medio y la redundancia implícita en estos sistemas. Es por ello que ciertos grupos de investigación ya han invertido recursos en aras de obtener avances en este campo (8).

Uno de los problemas de la realimentación viene por la reducción de las ventajas de la robótica flexible ya mencionadas, puesto que los materiales con los que se fabrican estos robots no son rígidos, pero la electrónica lo sigue siendo.

Acorde con esta circunstancia, se está investigando la fabricación de sensores y actuadores lo más coherentes posibles con las características de estos sistemas, permitiendo que la electrónica utilizada no sólo se pueda flectar, sino también estirar o comprimir (10). Ejemplos de materiales y electrónica de este tipo se pueden observar en la Figura 2.6

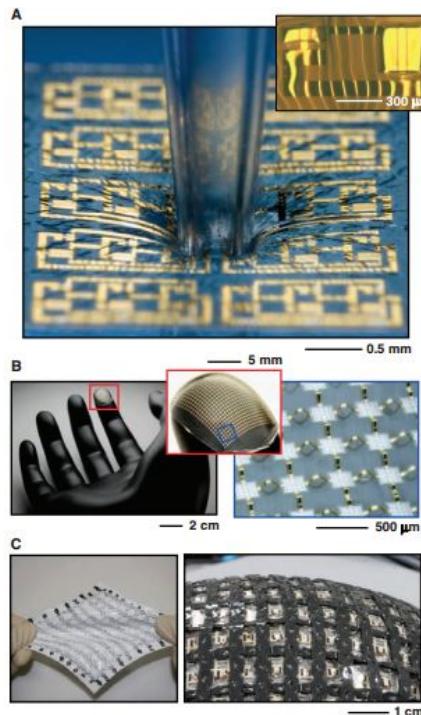
La mayor parte de las aplicaciones flexibles se actúan curvando sus elementos, de modo que los sensores a incorporar han de medir dicha deformación.

Los sensores implementados en estos sistemas se caracterizan por ser, en la mayoría de los casos, de no-contacto o con un módulo elástico muy bajo, combinados con materiales en fase líquida (9). Los sensores de flexión, utilizados en este trabajo, son, del mismo modo, empleados para medir la deformación del robot.

### **2.2.3. Métodos de control**

Como se ha explicado en el apartado de Modelado, no es posible conocer la cinemática de los robots flexibles, al menos en el mismo sentido que en los robots rígidos. Son necesarias herramientas para conseguir una solución aproximada, y simplificaciones mediante el modelo PCC, lo que supone el aumento de complejidad en el control de estos sistemas.

Los investigadores de este campo de la robótica en la mayoría de las ocasiones



**Figura 2.6: Ejemplos de electrónica flexible.** (A) Circuito de membrana de silicona flexible comprimido en el centro con un tubo. (B) Circuito de silicona flexible con un diseño mallado. (C) Filas de transistores orgánicos interconectados con conductores elásticos en una configuración flexible y curvilínea (10).

desarrollan las planificaciones de movimientos a bajo nivel, simplificando la cinemática inversa con los modelos mencionados (11).

Este control a bajo nivel, en el caso de aplicaciones neumáticas, se realiza mediante sensores encargados de la medida de la deformación del robot, el volumen de fluido introducido o la presión real del robot. Mientras que la presión y el volumen dependen del fluido tratado y no garantizan que la deformación se haya llevado a cabo de forma compatible con la deseaba, la medida de la deformación producida en el sistema permite un control más exacto de la efectividad de los movimientos. Si bien, los sensores de presión y volumen permiten una mayor seguridad y garantía de la cantidad de fluido introducido.

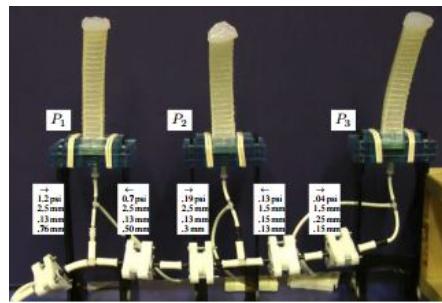
Muchas aplicaciones de la robótica flexible utilizan válvulas para producir la secuencia de movimientos deseada mediante la activación y desactivación de las mismas. La

## **2.3 Aplicaciones**

---

mayoría de estas aplicaciones está en bucle abierto, controlando la secuencia mediante cálculos temporales, a una presión y caudal de fluido concretas (7).

Otras investigaciones han llevado a cabo otro métodos de control, conduciendo, por ejemplo, al desarrollo de un sistema de control de la presión de múltiples válvulas a partir de una única fuente de presión (12), como se muestra en la Figura 2.7.



**Figura 2.7: Control de múltiples válvulas.** La presión se encuentra a la izquierda. Los cuadros muestran los parámetros de la válvula (12).

### **2.3. Aplicaciones**

La robótica flexible se encuentra en estos momentos en líneas de investigación y desarrollo. Sin embargo, en su escaso tiempo de vida ya se ha abierto camino en algunos campos científicos y tecnológicos.

Uno de estos campos científicos es el médico, motivado por la capacidad de los *soft robots* de deformarse y ser poco incisivos, además de la ventaja del reducido tamaño y peso que son capaces de alcanzar.

Entre su utilidad en este campo, se encuentran tanto las intervenciones quirúrgicas, como la sustitución de órganos y músculos. En este aspecto, interviene la naturaleza de estos robots: la imitación de seres vivos cuyo movimiento está basado en la contracción y dilatación.

Un ejemplo de esta línea de investigación se ha desarrollado en la Universidad de Harvard, mediante un dispositivo denominado "*segunda piel*", traducido del inglés "*second skin*", con la capacidad de asistencia al movimiento muscular (13).

## **2.3 Aplicaciones**

---

La utilidad de robots flexibles como elemento final de un robot rígido resulta muy práctica. El empleo de este tipo de pinzas o gripper, permite la sujeción de los objetos más firmemente y ofrece la posibilidad de sostener objetos cuya formas no han de ser uniformes o bien sean de tamaño reducido y difíciles de sostener mediante pinzas tradicionales. Su capacidad de deformación permite la perfecta adaptación a la forma del elemento a recoger y completar la tarea con éxito.

En la Figura 2.8 se puede apreciar como el gripper flexible se adapta y permite recoger objetos de formas muy diversas y no necesariamente rígidos.



**Figura 2.8: Robot flexible actuando como pinza.** La pinza se adapta perfectamente a la forma de los elementos a recoger.

La adaptabilidad al medio y amplia accesibilidad han conducido al desarrollo de *soft robots* caminantes utilizados en la inspección y operaciones de rescate en zonas de accidentes naturales o humanos, en los cuales el acceso de seres humanos podría resultar peligroso. En la Figura 2.9 aparece un nano robot que serviría para tales fines, fabricado por la universidad de Oyakama, Tokyo (14).

## **2.3 Aplicaciones**

---



**Figura 2.9: Nano robot flexible caminante de la universidad de Oyakama, Tokio.** La superficie del robot es inferior a la de un centavo, aunque es capaz de mover un tapón de plástico.

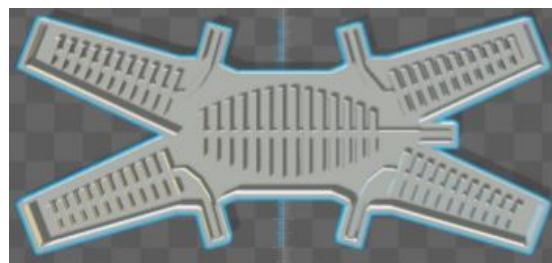
# 3

## Diseño y fabricación

El diseño en los *soft robots* cobra especial importancia debido a la papel de la deformación en el desempeño de los movimientos requeridos y a la ausencia de un modelo cinemático que permita facilitar su estudio. Acorde con esta circunstancia, el factor experimental acoge una gran relevancia en estos sistemas.

En este capítulo se tratan los procedimientos de diseño y fabricación del *soft robot* caminante fruto de este proyecto, tanto del molde para la fabricación del robot, como de la estación de trabajo existente (1) para adaptarla a la nueva funcionalidad requerida.

Antes de comenzar, conviene hacer una breve mención al estado de partida. El trabajo del cual se procede (1), concluyó con un modelo capaz de caminar con cierta eficacia, con el aspecto mostrado en la Figura 3.1.



**Figura 3.1: Robot de partida.** Se pueden observar los salientes para la introducción de los tubos que, además, se posicionan junto a cada cámara, en cuatro de ellas en sentido transversal al movimiento del robot, ocasionando pérdidas de rendimiento por fugas de aire y rozamiento.

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

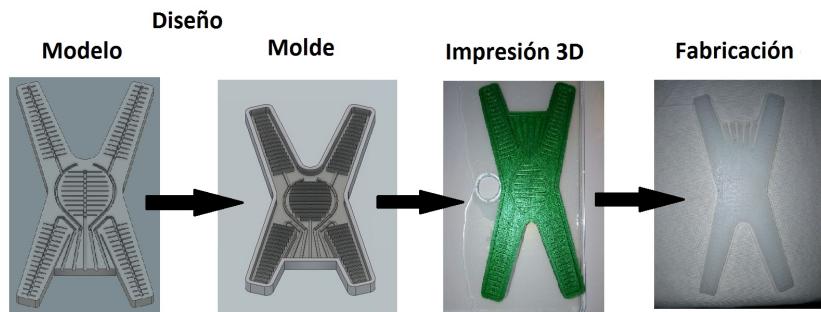
La carga de las camaras se hacía a presión constante, y la descarga a escape libre, sin poder mantener las camaras infladas. Esto se conseguia mediante la actuación de válvulas neumáticas 3/2 controladas mediante un microcontrolador.

El nivel de llenado y, consecuentemente, de deformación de las cámaras, se regulaba en base al tiempo en que permanecía abierta la valvula, decidiéndose este de manera experimental.

La marcha el robot, objetivo de todo robot caminante, se logra mediante la aplicación de las secuencias adecuadas sobre las cámaras, asimétricas para asegurar la deformación por su superficie superior.

#### **3.1. Diseño y fabricación del modelo**

Atendiendo a la funcionalidad que debía tener el robot concebido, el diseño de este trabajo se ha realizado mediante la herramienta CAD *Inventor*, lo que ha dado lugar al modelo deseado del robot en 3D y, a partir de este, confeccionar el molde. Dicho molde pasa a ser impreso en 3D y se procede a la fabricación del modelo en cuestión. En la Figura 3.2 se ilustra este procedimiento.



**Figura 3.2: Proceso de fabricación.**

En este punto, cabe señalar que, en un principio, únicamente se diseña la parte inferior del robot, siendo la parte superior una simple capa de silicona de reducido espesor que se colocará cuando haya curado la parte elaborada en el molde. Se explicará que esta situación cambia con el desarrollo del trabajo.

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

---

En el diseño se ha tenido en cuenta que el modelo no debe ser simétrico con respecto al plano horizontal (1), puesto que la deformación de cámaras no sería asimétrico, lo que origina el llenado en ambas caras (superior e inferior), de forma que las cámaras no se arquearían, efecto muy distante al deseado. Para originar la curvatura deseada, únicamente mediante la deformación de la superficie superior, procurando así la marcha del robot, es necesario realizar un diseño asimétrico.

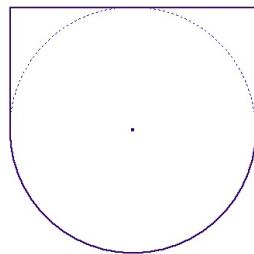
De acuerdo con esta filosofía, las vejigas de las cámaras han de estar distanciadas ligeramente con respecto a la superficie exterior superior, y más generosamente de la inferior. Este es el motivo de que la capa extra mencionada previamente cuente con un espesor muy reducido para garantizar el sellado de las cámaras sin provocar un efecto indeseado con la carga de fluido en las mismas.

En el proceso de fabricación se ha descartado el método de cera perdida debido a la complejidad que el drenado completo de las cavidades del robot supondría. Igualmente, la realización del molde implicaría un aumento en la necesidad de recursos técnicos, puesto que su fabricación sería más complicada, y económicos, debido al carácter desecharable con que contaría el molde.

En el proceso de diseño ha sido necesario tener en cuenta la fabricación del modelo. Por esta razón, los conductos que han de guiar al aire no se han realizado completamente de sección circular, forma más adecuada para evitar la deformación de los mismos aunque inviable con el método de fabricación llevado a cabo, esto es, por moldeo del cuerpo abierto, sellándolo mediante la aplicación de una capa adicional tras su curado. Acorde con esta circunstancia, se ha reflexionado y concluido en un diseño en el cual, al colocar dicha capa adicional de silicona, el resultado sea lo más similar posible a dicha sección circular. Con ello en mente, su sección pasa a ser la mostrada en la Figura 3.3.

La fabricación se ha modificado a lo largo del desarrollo del trabajo, adaptándose a los nuevos hallazgos tras analizar los resultados obtenidos, como se explicará en los próximos apartados, pero, en líneas generales, los pasos a realizar son los explicados a continuación:

#### **1º Diseño e impresión.**



**Figura 3.3: Sección de los conductos de aire del robot.** Su forma pretende aproximar la sección tras la fabricación a una sección circular.

Bajo los objetivos que ha de cumplir el prototipo, se lleva a cabo la elaboración del diseño del modelo en *Inventor* y posteriormente del molde capaz de confecionarlo.

Una vez adquirido este archivo, se da paso a la impresión en 3D, escogiéndose los parámetros más adecuados para un buen resultado a pesar de la complejidad del molde, como son:

- *Layer height.* Reducido y divisor de todas las cotas existentes en el diseño, 0.1 mm, a fin de lograr precisión en el eje Z y que no se perciba la separación de las mismas.
- *Shell thickness.* El mínimo posible, 0.4 mm por ser la boquilla del extrusor de dicho diámetro, a fin de que se alcancen los detalles más reducidos del diseño, establecidos en 0.8 mm.
- Retracción. Usada debido a la gran cantidad de vejigas distanciadas existen en el diseño, lo que motivaría la aparición de imperfecciones en el molde por la fluidez del filamento en el extrusor.

El resto de parámetros se escogen a fin de reducir recursos, temporales y económicos, sin perjudicar la precisión requerida.

#### 2º. Vertido de silicona.

Se extiende la silicona en estado líquido sobre el molde impreso, estando este dispuesto en una superficie plana y completamente horizontal, y sobre una superficie plana, lo que supone la producción de las partes superior e inferior del modelo.

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

---

A continuación, se espera durante el tiempo de curado de la silicona, entre dos y cuatro horas, a temperatura ambiente.

La Figura 3.4 persigue la ilustración de este paso.



**Figura 3.4: Segundo paso: vertido de silicona.** Se produce la parte superior (derecha) e inferior (izquierda) del modelo.

#### **3º. Sellado del modelo.**

Ambas partes confeccionadas han de conformarse en un único prototipo mediante la aplicación de una capa intermedia de silicona que permita el sellado de las cámaras del robot.

Esta capa de unión debe ser de espesor extremadamente reducido a fin de garantizar el sellado sin producir la obstrucción de las vejigas o de los conductos del robot, fácilmente bloqueables.

Tal y como se expondrá en los próximos apartados, se emplea una brocha a fin de proporcionar una capa de adhesión de mínimo espesor.

#### **4º. Implementación de los sensores.**

A fin de lograr los objetivos citados en el capítulo de **Introducción**, entre los que se encuentra la realimentación del sistema, se lleva a cabo la incorporación de sensores de flexión.

Dichos sensores, han de ser localizados en la parte inferior del prototipo, bajo las cámaras, por la rigidez que le otorgan al modelo. En los próximos apartados se detallará este motivo, así como su orientación, finalmente establecida tal y como aparecen en la Figura 3.5



**Figura 3.5:** Orientación de los sensores.

#### **5º. Introducción de los actuadores.**

Han de incorporarse los tubos en el interior de las guías que sirvan de conductos para el aire que origine la deformación de las cámaras.

Debido a la falta de estanqueidad percibida en los prototipos, finalmente se decide que es necesaria una extensión en el modelo que permita la incorporación estanca de los tubos. El desarrollo que ha llevado a la citada conclusión se explicará a lo largo del presente capítulo.

Se pasa a continuación a describir el desarrollo del diseño, fabricación y ensayos con los errores y decisiones que han llevado hasta el diseño actual.

##### **3.1.1. Primer diseño**

###### **3.1.1.1. Diseño**

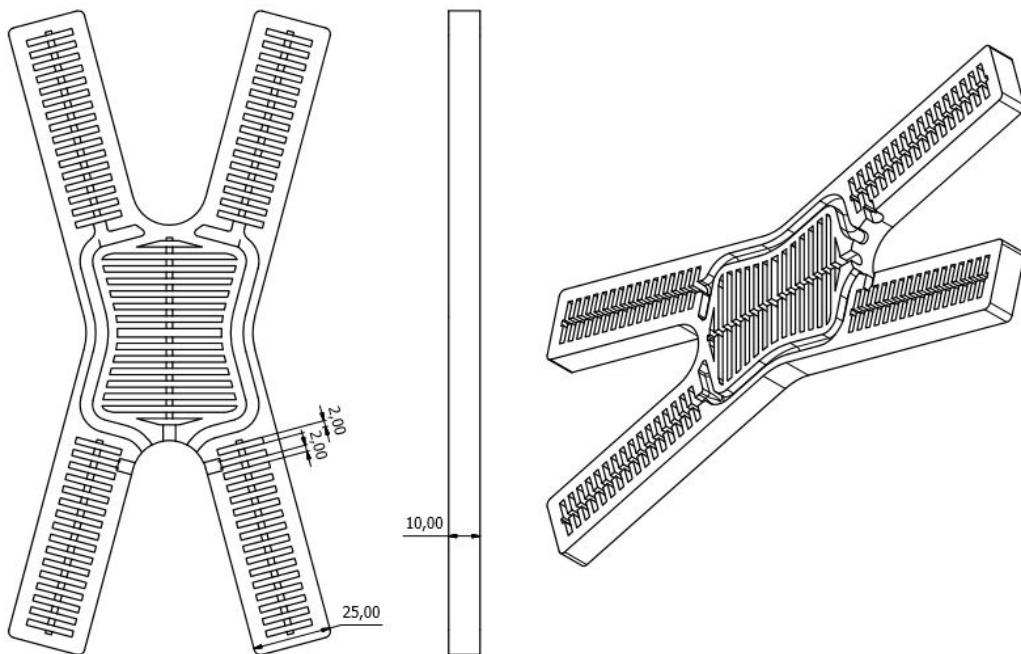
El diseño de este modelo, cuyo aspecto se muestra en la Figura 3.6, pretende subsanar los problemas detectados del diseño de partida. Entre los aspectos tratados se exponen los siguientes puntos:

- **Conductos interiores.** Se decide la introducción de todos los conductos por una única sección, siendo dicha incorporación lo más paralela posible a la dirección de movimiento, en aras de facilitar la movilidad y no repercutir negativamente en el rendimiento del prototipo.

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

- **Reducción del peso.** Se pretende optimizar al máximo el movimiento, deduciéndose que el peso está en relación inversa con el rendimiento del mismo, por lo que se opta por minimizar de forma sustancial la cantidad de silicona del robot.
- **Centro de masas equilibrado.** La supresión de silicona no se efectúa al azar, sino que se escogen deliberadamente a fin de, además de reducir el peso, equilibrar el robot y llevar a un diseño lo más simétrico posible.
- **Aumento de vejigas.** Se deduce que para conseguir un arqueo de las cámaras adecuado, estas han de contar con gran capacidad, y se considera que esto se produce como consecuencia de un gran número de vejigas en cada cámara, minimizando para ello la distancia entre las mismas (2 mm).

La fabricación de este molde se produce en una impresora 3D de alta precisión. El material de impresión es ABS, dato que tendrá especial relevancia más adelante.



**Figura 3.6: Diseño del primer modelo.** Los conductos a cada cámara van por el interior del modelo. Se intenta dejar lo más equilibrado posible el prototipo.

#### **3.1.1.2. Fabricación**

La fabricación de este modelo sigue los pasos generales previamente establecidos en el apartado 3.1, Diseño y fabricación del modelo, a excepción de los sensores, cuya incorporación no se lleva a cabo hasta el segundo diseño.

Acorde con este planteamiento, este proceso tiene lugar de acuerdo a las siguientes estapas:

- Diseño e impresión del molde.
- Vertido de silicona sobre el molde y sobre una superficie plana, conformandose tras el proceso de curado los cuerpos inferior y superior del prototipo.
- Sellado del modelo mediante la aplicación de la capa de adherencia entre los cuerpos realizados en la etapa anterior.
- Introducción de los actuadores.

#### **3.1.1.3. Ensayos y conclusiones**

Con estos modelos el fruto de los ensayos no resulta satisfactorio. Entre las conclusiones que se sacan de este diseño son:

- **Falta de estanqueidad a la entrada.** Los tubos son de un diámetro de 4 mm, por lo que los conductos de entrada se conciben del mismo tamaño, sin considerar la elasticidad de la silicona. Por tanto, este fallo requiere de un nuevo diseño para su enmienda.
- **Falta de homogeneidad.** Resultan zonas del robot con más silicona que otras, lo que influye muy significativamente en la deformación de las cámaras. La rectificación de este fallo requiere de medidas correctivas en el método de fabricación. En este punto del trabajo, se razona que la causa de esta imperfección podría ser la falta de horizontalidad en el terreno sobre el que se efectúa la fase de curado del prototipo, motivo que, más madurado el proyecto, se descubriría que no contribuye a este problema tanto como el molde impreso en cama caliente.

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

---

- **Falta de distancia en la entrada a las patas traseras.** Debido a la reducida distancia existente, la silicona no sostiene de forma adecuada al tubo, aun aplicando medidas para solventar el primer problema citado. Se necesita más distancia de entrada, lo que supone de nuevo un descuido en el diseño.
- **Ineficiencia de la deformación de las cámaras.** La deformación de las cámaras estancas, una vez selladas para solventar el primer problema, no es eficiente, como se muestra en la Figura 3.7. En el caso de las patas, sólo se deforma al final de la misma, dejando media cámara prácticamente inutilizada. En el caso de la cámara central, su efectividad es mayor, aunque el tubo se eleva produciendo una obstrucción en el mismo con la silicona, implicando la actuación del usuario para reconducirlo manualmente.



**Figura 3.7: Ensayos con el primer modelo.** En el centro y en la parte inferior aparecen las cámaras delanteras. En la parte superior se muestra la cámara central. Las cámaras traseras carecen de deformación por ser el recorrido de su entrada muy corto.

En estos ensayos no se contaba con los sensores, por lo que los resultados de deformación y efectividad podrían cambiar con la incorporación de los mismos. En efecto, los sensores aportan rigidez al robot, por lo que a fin de conseguir esta deformación habrá que concebir un modelo más efectivo.

#### 3.1.2. Segundo diseño

##### 3.1.2.1. Diseño

Con las conclusiones sacadas de los ensayos del primer modelo era necesario rediseñar el robot, concluyendo en el diseño de la Figura 3.8. Entre los aspectos tratados en el nuevo diseño se encuentran los siguientes:

- **Conductos de menor diámetro.** A fin de una mayor estanqueidad se reduce el tamaño de los conductos a 2 mm de diámetro.
- **Entrada de tubos de mayor distancia.** Con el objetivo de evitar la expulsión de los tubos por la diferencia de presiones y falta de agarre en la entrada, se amplia la distancia a 11.5 mm en el caso de las cámaras traseras y a 6.8 mm en el caso de la cámara central.

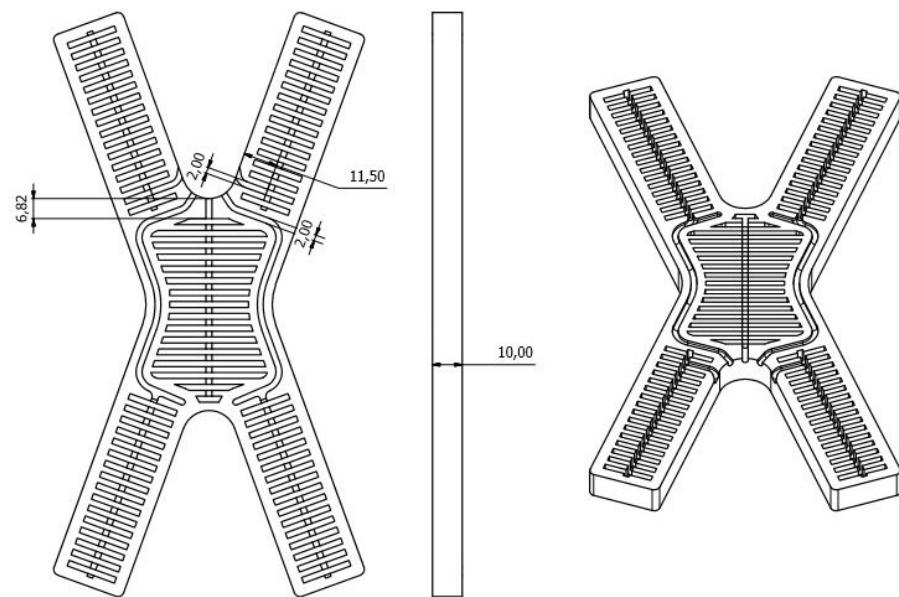


Figura 3.8: Diseño del segundo modelo.

#### **3.1.2.2. Fabricación**

Con este diseño, se produce la fabricación de diferentes modelos modificando los métodos de fabricación a fin de solventar los problemas que aparecen. A continuación se citan los más relevantes:

1º. Se realiza como se ha citado al comienzo de este capítulo, en el apartado Diseño y fabricación del modelo, siguiendo las líneas generales.

Se trata de un modelo muy poco homogéneo: las patas son de espesor muy reducido, mientras que la cámara central, de espesor demasiado extenso.

A fin de enmendarlo, se toma la medida del terreno en el que cura el robot con un nivelador de la horizontalidad de la superficie. A pesar de la medida, los modelos así realizados mantienen el problema.

El problema del terreno se solventa fácilmente con el nivelador, pero el molde, impreso en cama caliente con ABS, está curvado, por lo que habrá que perfeccionar esta situación.

2º. Se posiciona sobre el molde una tabla de madera con un lastre a fin de aplanar el molde.

Tras la espera del tiempo prudente para producirse la cura de la silicona, se levanta la tabla, con lo que desgarra el robot, apartando una pequeña parte de silicona, tal y como aparece en la Figura 3.9.

A pesar de este inconveniente, con este método se descubre que el problema principal de la homogeneidad es la curvatura del molde, debido a que el modelo, aunque defectuoso por la supresión de material por la tabla de madera, es extraordinariamente homogéneo en cuanto a la similitud en la cantidad de silicona de todas sus cámaras.

De esta circunstancia se deduce que el principal problema es la curvatura del molde, posiblemente debido a la impresión en cama caliente. En lo sucesivo se imprimirá en cama fría con PLA, aunque en una impresora de menor precisión que la utilizada hasta el momento, por lo que en el diseño se tendrá en cuenta la imposibilidad de diseño de detalles de espesor menor a 0.8 mm, aproximadamente.



**Figura 3.9: Cuerpo del prototipo al posicionar una tabla lastrada sobre el molde en la fase de curado.**

- 3º. Si la capa de adhesión que procura la unión entre la capa extra y el robot es demasiado gruesa, se introduce en los conductos del robot, inutilizando los mismos, por lo que se decide emplear una brocha para asegurar el mínimo espesor posible en dicha capa.
- 4º. Se aumenta el espesor de la capa extra, tratando de que la deformación se produzca en la capa exterior fija al modelo desde el principio, más sellada que la capa extra colocada en último lugar.
- 5º. Se disminuye el espesor de la capa extra, para minimizar el peso del robot y aumentar su eficacia.

#### **■ Implementación de sensores**

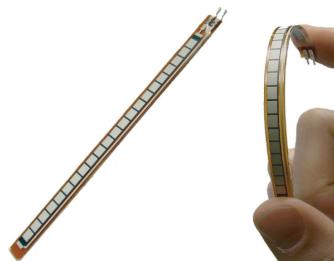
En el diseño del robot, el tamaño de las cámaras se ha escogido ajustándolo al tamaño de los sensores, a fin de no perder precisión.

A partir de este modelo se posicionan los sensores. Para ello, se hace un análisis de su posición y conexiones. Los sensores utilizados son sensores de flexión, cuyas características y modo de utilización se detallan en el capítulo 4, **Arquitectura Hardware y Software**.

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

---

Estos sensores no son más complejos que resistencias variables. Éstas, consisten en tramos alternados de buen conductor y mal conductor en serie, de modo que, cuando se flecta en el sentido en que estos tramos se separan, la resistencia aumenta; mientras que cuando se juntan, disminuye. En la Figura 3.10 se muestra el sensor de flexión en su posiciones recta y alejando el conductor.



**Figura 3.10: Sensor de flexión.** A la izquierda se muestra en su posición de reposo, mientras que a la derecha aparece doblado con alejando los tramos de conductos.

Se calcula experimentalmente, mediante la flexión de los sensores manualmente hasta llegar a superponer un extremo del mismo sobre el otro, el rango de lectura de los sensores cuando dobla en un sentido u en otro para concluir en qué sentido resultaría más interesante colocarlo, ya que se va a flectar en un único sentido en todas las ocasiones. Estos datos se muestran en la Tabla 3.1.

**Cuadro 3.1: Valores de la resistencia del sensor de flexión en sus posiciones más significativas.** Aparece el rango de variación de la posición de reposo a la flexión máxima a cada lado

Posición	Flexión aproximando el conductor	Plano	Flexión alejando el conductor
Resistencia ( $k\Omega$ )	20	22	42
Rango de medidía ( $k\Omega$ )	2	0	22

A la vista de los resultados, es mayor el rango de aumento de resistencia desde la posición plana, por lo que la orientación de implementación ya está determinada.

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

---

Otro tema a tener en cuenta es la posición de los sensores. En un primer momento, se considera la posibilidad de ponerlos en la parte superior. Sin embargo, los sensores dan rigidez al robot, impidiéndole flectar en la dirección en la que estos se encuentren. Por ello, finalmente se posicionan en la parte inferior del robot.

Una vez concluida la decisión sobre su posición, se llevan a cabo un ensayo de interferencia entre cámaras a fin de optimizar el empleo de los sensores y, en la medida de lo posible, prever los fallos para tener la capacidad de evitarlos.

El método de llevar a cabo este ensayo consiste en la lectura del sensor de una de las cámaras laterales al cargar de aire la cámara central. Bajo estas condiciones, los resultados extraídos se resumen en un voltaje máximo de 2.38 V, mínimo de 2.36 V, y medio de 2.37 V, dando lugar a una variación relativa del 0.4 %. Acorde con estos resultados se descarta la posibilidad de influencia entre cámaras.

En cuanto al conexionado, en un principio se intenta la introducción de los cables por la silicona e incluso poner las resistencias del divisor de tensión en el interior. Sin embargo, esta opción queda descartada por la excesiva complejidad en la fabricación.

Finalmente, los sensores se posicionan con los pines de conexión en la dirección de la entrada de los tubos, en aras de acortar la longitud de los cables, que irán a un conector situado sobre los tubos, como se explicará más adelante.

El método de fijación de los sensores al robot es tan simple como locaclizarlos sobre la silicona ya curada y verter silicona líquida sobre ellos. Este paso aparece en la Figura 3.11.

El conexionado entre los sensores y el conector citado se realiza mediante unos cables al aire, que no se sueldan con los sensores para tener completa modularidad, facilitando la fabricación. Para ello, se utilizan pequeños conectores entre el cable y los sensores.

#### **3.1.2.3. Ensayos y conclusiones**

Se ensayan los robots construidos con los distintos métodos de fabricación anteriormente citados.

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

---



**Figura 3.11:** Robot una vez implementados los sensores. Todos los sensores están en una misma dirección para minimizar la longitud de cable.

Previamente, se realiza un ensayo de contracción con el fin de diagnosticar el problema de la homogeneidad. Este ensayo se ilustra en la Figura 3.12.



**Figura 3.12:** Ensayo de contracción. A la izquierda se encuentra la silicona líquida; y a la derecha, curada.

Se rellenan 42 mL de silicona líquida y se espera a que cure para determinar si se ha contraído de forma significativa.

Tras el curado hay aproximadamente 42.5 mL. La variación ha sido menor al 1%. De esta situación se deduce que esta característica no juega un papel relevante en la

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

---

falta de homogeneidad del robot.

Concluido este ensayo, las conclusiones obtenidas de los ensayos realizados con los distintos métodos de fabricación son las siguientes:

- Con el método de fabricación general, el inconveniente de falta de estanqueidad del robot sigue persistiendo. Se producen fugas en la entrada a dichas cámaras.
- Con el método que aplica la capa extra más gruesa, no se obtienen los resultados deseados, ya que, a la presión de trabajo (2 bares) no se curvan las cámaras, sino que se estiran porque no pueden superar la tensión superficial del robot.

Con un aumento en la presión, las cámaras se curvan, aunque las delanteras en un sentido y las traseras en otro, como se puede ver en la Figura 3.13, imposibilitando la marcha del robot, por lo que se descarta este método de fabricación.



**Figura 3.13: Pruebas manteniendo la capa extra más gruesa.** Las patas no se curvan en el mismo sentido, imposibilitando el avance del robot.

- Con el método que implica una capa extra más fina, se obtienen resultados contraproducentes, ya que la tensión superficial de la capa no es capaz de forzar la retirada de aire cuando se ordena al robot que se vacíe desde la unidad de mando, por lo que se obtiene un robot inestable que sólo admite su llenado.
- Por último, el método de implementación de sensores implica que los pinos de las patas traseras están hacia el exterior del robot, impidiendo que se apoye sobre las siliconas y perdiendo estabilidad.

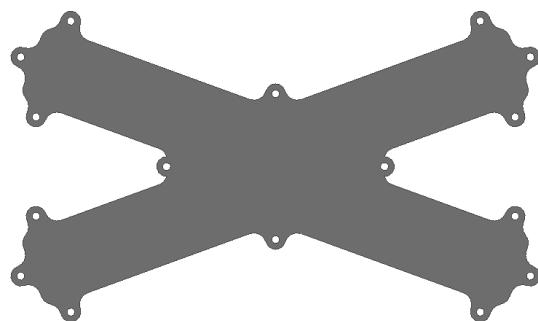
#### 3.1.3. Tercer diseño

##### 3.1.3.1. Diseño

Tratando de resolver los problemas del anterior diseño, tanto los que no dependen de la fabricación como los que facilitarían el proceso de fabricación y la disminución de errores en la misma, se lleva a cabo un nuevo diseño.

Siguiendo con este razonamiento, se decide imprimir el nuevo molde en PLA, evitando así la contracción de material que se produce al imprimir en cama caliente, ya que se reduce el coeficiente de dilatación térmica.

Además de evitar la curvatura del moldea través de la modificación del método de impresión, se incorporan unas aletas en el molde de modo que se pueda anclar a una superficie plana, como las mostradas en la Figura 3.14.



**Figura 3.14: Diseño de un molde con aletas.** Las aletas permiten la fijación del molde a una superficie plana.

Este nuevo diseño intenta, además, solventar el problema de un curvado de las cámaras ineficiente. Es por ello que se analiza con más detalle la distancia que ha de existir entre las vejigas de las cámaras para poder doblarse de la forma requerida.

Tras consultar determinadas bibliografías (7) (15), se llega a la conclusión de que el planteamiento inicial de conseguir el mayor número de vejigas es erróneo, puesto que, al introducir aire en las vejigas, estas se expanden, e, incapaces de hacerlo en el sentido longitudinal de la cámara al existir otra vejiga tratando de expandirse muy próxima, finalmente lo llevan a cabo en sentido transversal.

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

---

En el nuevo diseño, se diminuye a 0.8 mm el espesor de las vejigas, el mínimo de precisión de la impresora utilizada, y a 4 veces más (3.2 mm), la distancia entre dos vejigas contiguas.

Otro cambio importante en el diseño es la forma de la cámara central, que pasa a ser elíptica en lugar de seguir el contorno del robot. El motivo para esta decisión se halla en los ensayos realizados con los anteriores diseños. La cámara central en todas las ocasiones se llena en el centro, sin seguir una distribución uniforme. Por ello, se pasa a un diseño en el que, con menor espacio disponible, se distribuya por todo él.

Además, la entrada de los tubos se obstruye una distancia de 1 mm a fin de luego ser perforada con el mínimo diámetro necesario. La razón para llevar a la práctica esta operación es la falta de estanqueidad apreciada en todos los prototipos hasta el momento.

Una última alteración es la forma de las patas que, en lugar de rectas, pasan a estrecharse desde el centro al extremo. El motivo de esta modificación es que las vejigas vayan disminuyendo su anchura a lo largo de la cámara, garantizando una distribución de fluido más eficiente. Hasta ahora, la mayor parte del aire se acumulaba en el extremo, dejando inutilizada gran parte de la cámara.

El tercer diseño, con los cambios mencionados, se muestra en la Figura 3.15.

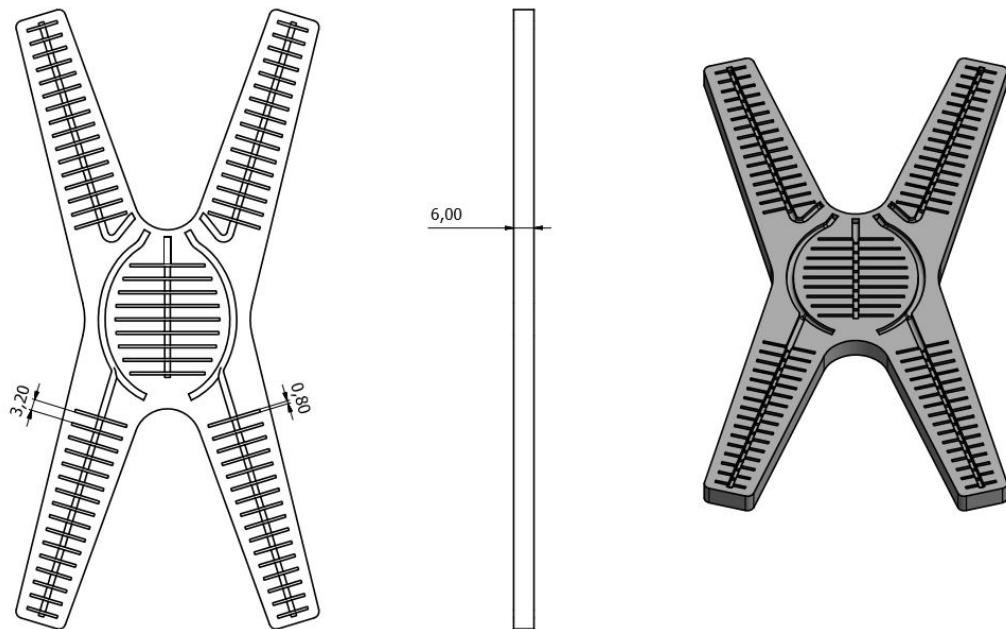


Figura 3.15: Tercer diseño.

### 3.1.3.2. Fabricación

Se realiza la fabricación siguiendo el procedimiento general, salvo por la incorporación de los sensores, en los que se altera su orientación de modo que los que se encuentran sobre las cámaras laterales tengan los pines hacia la cámara central, permitiendo así un correcto apoyo por parte de las patas en las secuencias de marcha.

Esta nueva implementación es la que se muestra en la Figura 3.16



Figura 3.16: Implementación de los sensores. Los sensores de las cámaras laterales se orientan hacia el interior; el de la central, hacia la zona de la entrada de los tubos.

#### 3.1.3.3. Ensayos y conclusiones

Tras imponer las secuencias de marcha sobre este nuevo modelo se llega a los siguientes resultados:

- El problema de la falta de homogeneidad se ha resuelto. Los modelos realizados con este nuevo diseño tienen grosores prácticamente idénticos en todas sus cámaras. Sin embargo, en la carga de aire de las cámaras se produce la aparición de burbujas, en lugar de un llenado continuo en la cámara. Esta situación, mostrada en la Figura 3.17, conduce a la deformación plástica del prototipo, llevándolo a un estado de inutilidad para el fin perseguido.



**Figura 3.17: LLenado no deseado de las cámaras.**

- El problema de falta de estabilidad en el contacto de las cámaras traseras por la presencia de los pines de los sensores también se ha solventado. El robot es capaz de posicionarse sobre las cuatro patas y mantenerse de forma estable.
- El problema de un llenado ineficiente en las cámaras se ha enmendado. Las cámaras pasan a tener la curvatura deseada cuando son cargadas, además de una distribución de aire sobre ellas uniforme.
- La estanqueidad en las cámaras no se ha solucionado, produciéndose el vacío de estas cuando deberían mantener el aire, por lo que se requiere de un nuevo diseño.

#### 3.1.4. Cuarto diseño

##### 3.1.4.1. Diseño

Este diseño tiene por objetivo único el solventar el problema de la estanqueidad. Es similar al tercer diseño, como se puede apreciar en la Figura 3.18, salvo por la inclusión de extensiones en la entrada. Estas extensiones se acoplarán a los tubos por el exterior, dejando cierta longitud de tubo para aumentar significativamente la estanqueidad. Además, en caso de que alguna cámara lo necesite, se ajustarán el tubo y la extensión de silicona mediante bridas.

Además se opta por el diseño de un molde para la capa adicional, a fin de conseguir un control preciso de la homogeneidad de la capa y del espesor de la misma.

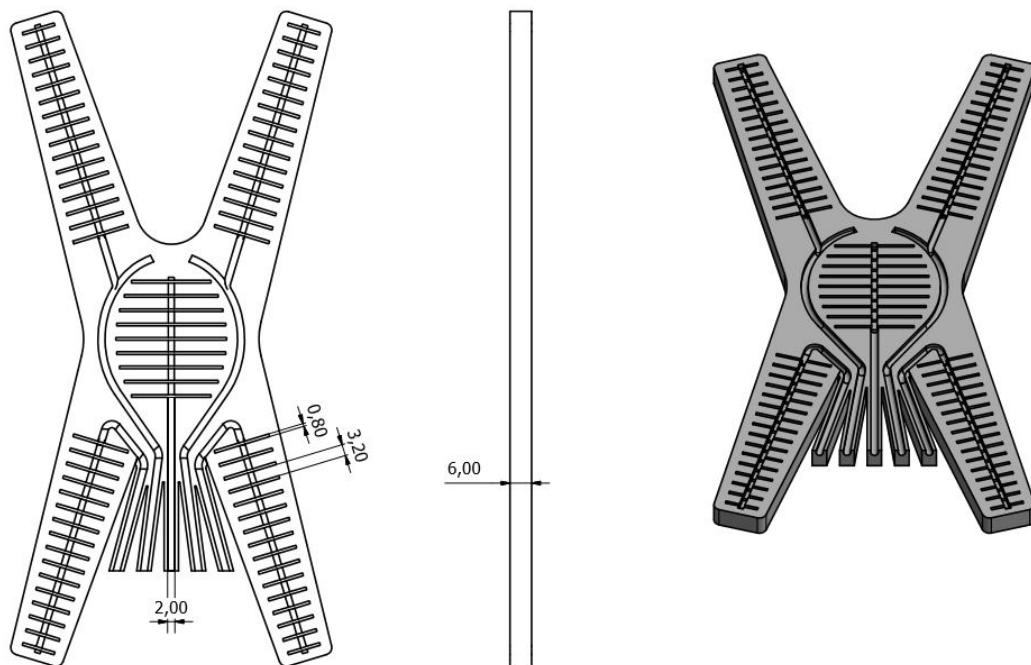


Figura 3.18: Cuarto diseño.

#### **3.1.4.2. Fabricación**

El método de fabricación e implementación de los sensores siguen, en un principio, lo realizado en la fabricación del tercer diseño, en el apartado Fabricación. Sin embargo, se van realizando modificaciones para solventar los defectos en la deformación:

1º. Se realiza como se ha citado en el epígrafe 3.1.3.2.

2º. Se invierte el robot, es decir, la capa de los sensores pasa a situarse en la capa adicional, mientras que la superficie fija al cuerpo inicial, se convierte en la capa deformada. Se considera que la rigidez que proporcionan los sensores a la capa adicional es suficiente para permitir la deformación por la otra capa, pero no lo es, tal y como se expondrá en el próximo apartado.

Esta inversión se produce en aras de que el conducto longitudinal común a todas las vejigas de la cámara se encuentre en la posición más alejada de la cámara deformada, a fin de que la inyección de aire produzca una deformación circular de la cámara, no formando una cúspide sobre dicho conducto.

3º. Con el robot invertido, idéntico al caso anterior, se pasa a un espesor de capa de deformación menor, a fin de permitir la mayor flexión de la misma, pues ha de distanciar menos que la capa adicional con respecto a la vejiga para permitir la deformación de la capa.

4º. Se incorpora una malla en la capa de los sensores, que se mantiene como la adicional, a fin de proporcionar rigidez a esta superficie, y así permitir una deformación más eficiente de las cámaras.

#### **3.1.4.3. Ensayos y conclusiones**

Se llevan a cabo las modificaciones en el diseño y fabricación descritas, concluyendo en los siguientes resultados:

- El método de fabricación que imita el descrito en el epígrafe 3.1.3.2 produce una deformación ineficiente.

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

---

Se forman burbujas en el prototipo que conllevan una deformación plástica, lo que supone una inutilización del robot para los fines requeridos, ya que el aire siempre tenderá a las zonas que le ofrezcan menor tensión superficial, que son, de hecho, las deformadas plásticamente.

Esta circunstancia, por otra parte, conduce, en notable número de ocasiones, a la rotura de alguna cámara, no tanto por una presión elevada como por la fatiga sufrida a lo largo de los ciclos de la secuencia de marcha.

En la Figura 3.19 se ilustra el estado de esta deformación.



**Figura 3.19: Deformación plástica de las cámaras.**

- La inversión de la superficie de implementación de los sensores sin modificaciones adicionales conduce a una deformación ineficiente.

La tensión superficial en ambas caras del prototipo es similar debido, en un caso a un espesor mayor, y, en el opuesto, a la incorporación de los sensores.

En este caso, el modelo no se deforma mediante la flexión, sino que se produce un estiramiento longitudinal en las cámaras, y el aire no logra introducirse en las mismas completamente.

Finalmente, la presión ejercida provoca la pérdida del sellado del robot, alejando el cuerpo de la capa adicional, e inutilizando al robot.

- La modificación de este último método mediante la conformación de un espero de capa inicial de reducido tamaño conlleva resultados contraproducentes.

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

---

En primer lugar, el espesor de capa tan reducido implica una gran sensibilidad del robot. Cualquier objeto levemente afilado puede rasgar la capa, produciendo la perforación de la cámara.

Por otra parte, la deformación que se produce no es la deseada, siendo, de nuevo, poco uniforme y con formación de burbujas, aunque de menor notabilidad, tal y como se muestra en la Figura 3.20.

Finalmente, se produce la rotura del modelo por fatiga sobre las cámaras deformadas plásticamente.



**Figura 3.20: Llenado de las cámaras empleando una capa de deformación de espesor reducido.**

- La incorporación de la malla permite la obtención del método de fabricación definitivo.

Esta tela, permite disminuir la flexibilidad de la capa de los sensores, imponiendo el sentido de la deformación de las cámaras por la capa deseada. En la Figura 3.21 se muestra dicha deformación.

La rigidez que aporta, por tanto, este material, junto con el espesor suficiente de capa de deformación facilitan el logro de un método de fabricación eficiente, que

### **3.1 Diseño y fabricación del modelo**

---



**Figura 3.21:** Deformación eficiente de las cámaras.

se resume en los siguientes pasos:

- Diseño e impresión en 3D del molde.
- Vertido de silicona sobre los moldes (Figura 3.22).



**Figura 3.22:** Vertido de silicona en los moldes superior e inferior.

- Sellado del prototipo.
- Incorporación de los sensores y de la malla, vertiendo silicona para fijarlos (Figura 3.23).

### **3.2 Implementación del sistema embebido**

---



**Figura 3.23: Fijación de la malla y los sensores al robot.**

- Introducción de los actuadores.

## **3.2. Implementación del sistema embebido**

La lectura de los sensores se realizada desde una Arduino-Mini embebida en el robot, cuya decisión de compra y características se detallan en el capítulo 4, **Arquitectura Hardware y Software**. La decisión de localización de la misma se justifica a continuación.

Con las dimensiones y el peso de la Arduino-Mini posicionarla encima del robot sería complicado. Además, también habría que colocar el divisor de tensión necesario para la lectura de los sensores.

La cámara central necesita, en un régimen normal, más presión que el resto de cámaras para curvarse de forma satisfactoria. Sin embargo, se carece de reguladores in-

### **3.2 Implementación del sistema embebido**

---

dependientes de presión y caudal para cada válvula, siendo de uso común los existentes y se ha de llegar a una solución de compromiso.

Por ello, el hecho de implementar la Arduino-Mini y el divisor de tensión sobre dicha cámara queda descartado.

La opción más viable es, por tanto, colocar el conjunto sobre los tubos, en el exterior, de forma que se mueva de sincronamente con el robot, y sin impedir la deformación de ninguna cámara.

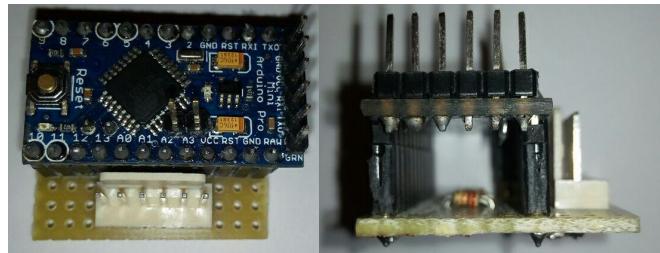
Por este motivo, se realiza un sistema compacto que englobe al conjunto Arduino Mini-divisor de tensión. Este sistema, mostrado en la Figura 3.24, consiste en una placa de topos con las conexiones necesarias para realizar el divisor de tensión.

Estas conexiones, cuyo detalle se encuentra en el Capítulo 4, persiguen el empleo de un conector a fin de dotar de modularidad a este subsistema con respecto al robot.

Se empleará un cable plano con dos tipos dispares de conectores a ambos extremos:

- En un extremo, cuyo fin es la conexión a los sensores, existirán cinco conectores JST de tamaño reducido, con dos pines cada uno y con el paso adecuado para acoplarse a cada uno de dichos dispositivos.
- En el otro extremo, empleado para el acoplamiento con el sistema embebido, existirá un conector JST de mayor tamaño, el adecuado para el paso existente en la placa de topos, y con seis pines: cinco de ellos a fin de efectuar las lecturas analógicas y el sexto encargado de la alimentación a 5 V, común a todos los sensores.

### **3.3 Diseño y fabricación de la estación de trabajo**



**Figura 3.24: Sistema embebido.** El conector JST de 6 pines se utiliza para la conexión con los sensores. 5 de los pines son para la lectura de los sensores y el restante es para la alimentación, común a todos los sensores.

### **3.3. Diseño y fabricación de la estación de trabajo**

El control del *soft robot* de este trabajo se realiza a través de un conjunto de relés que accionan las válvulas encargadas de ceder o impedir el paso de aire al robot. Se trata, por tanto, de un sistema neumático, cuyo circuito se detallará en el Capítulo 4, **Arquitectura Hardware y Software**.

En el trabajo de partida de este proyecto (1), se utilizaban cinco válvulas 3/2, accionadas por cinco relés. En la Figura 3.25 aparece una imagen de la estación de partida.



**Figura 3.25: Estación de trabajo de partida.** Cuenta con relés, válvulas, regulador de presión, Arduino-Mega 2560 y fuente de alimentación de 12 V.

### **3.3 Diseño y fabricación de la estación de trabajo**

---

El inconveniente de estas válvulas es la incapacidad de mantenerse en un estado intermedio entre llenado y vaciado de las cámaras, impidiendo mantener el aire en su interior.

En este trabajo es necesario dicho estado, por lo que se han de adquirir válvulas 2/2 que, localizadas en serie con las 3/2 existentes, permitan dicho estado intermedio.

El tamaño de las válvulas adquiridas, cuyo proceso de selección se explicará en el próximo capítulo, impide la modificación de la estación de trabajo sin llevar a cabo ampliaciones.

Esta circunstancia supone la creación de una pequeña tabla de PVC en la que se localizan las cinco válvulas 2/2 con sus respectivos rácores, en codo para permitir el acoplamiento, en el interior. De esos rácores partirán los tubos que conectarán las válvulas 3/2 con las 2/2. Esta nueva tabla es la mostrada en la Figura 3.26.



**Figura 3.26: Soporte de las válvulas 2/2.**

Además, es necesaria la incorporación de dos nuevos relés a fin de tener los suficientes (diez), para controlar diez válvulas.

Acorde con esta situación, el resultado final de la estación de trabajo es el que queda en la Figura 3.27.

### **3.3 Diseño y fabricación de la estación de trabajo**

---



**Figura 3.27: Estación de trabajo completa.**

# 4

## Arquitectura Hardware y Software

Con el objetivo de realizar un prototipo funcional, además de un modelo de silicona, es necesario disponer de una serie de periferia para controlarlo y actuarlo.

En este capítulo, se aborda toda la arquitectura del robot, desde la programación software hasta los componentes necesarios para el control y movimiento del sistema.

### 4.1. Selección de componentes electrónicos y neumáticos

La arquitectura hardware del robot está formada por los elementos físicos que actúan sobre el mismo para permitir su movimiento, reciben la información de los sensores o procesan los algoritmos de control.

Este trabajo cuenta con un sistema neumático, controlado a partir de los citados componentes Hardware, que permite la actuación sobre el prototipo.

Los requisitos necesarios para estos elementos no son independientes, sino que están altamente interrelacionados entre sí. Es por ello que para escoger un componente determinado se ha de considerar en conjunto, no como un elemento independiente.

Cabe destacar que en este trabajo se partía de determinados elementos, no modifi-

## **4.1 Selección de componentes electrónicos y neumáticos**

---

cables por razones tanto técnicas como económicas, y que el resto de los componentes ha sido necesario adaptarlos a los ya existentes.

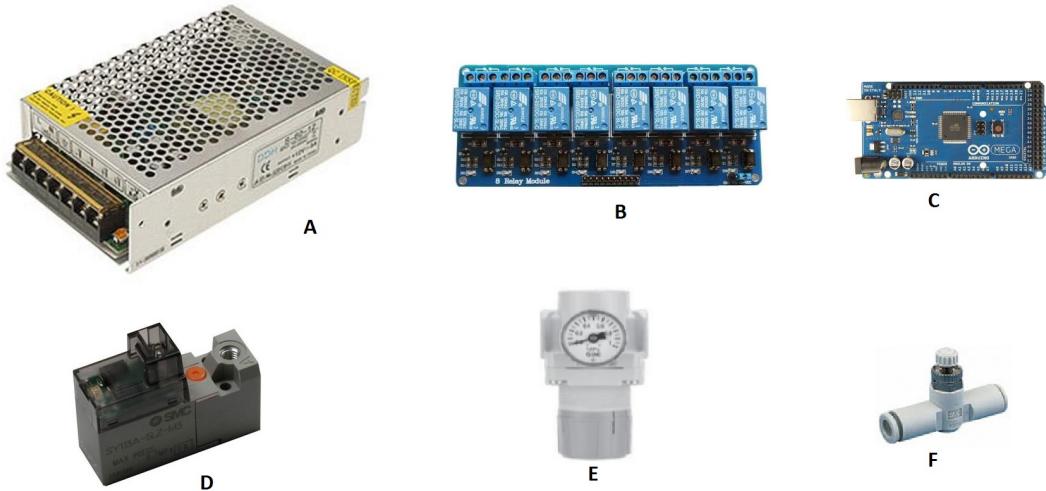
### **4.1.1. Componentes de partida**

La mayoría de dispositivos utilizados en el trabajo de partida (1), han sido de interés en este trabajo. Entre ellos, se encuentran los siguientes:

- **Electroválvulas 3/2.** Seis válvulas de accionamiento eléctrico de 12 V, controladas a través de los relés mediante la Arduino. Se encuentran sobre una placa con distribuidor común, simplificando así el montaje.
- **Regulador de presión.** Permite ajustar de forma manual el valor de presión dado por la fuente neumática externa. Dispone de un manómetro.
- **Regulador de caudal.** Su función consiste en el ajuste del caudal de forma manual tras la salida del regulador de presión.
- **Fuente de alimentación de 12 V y 8.5 A (100 W).** Está conectada al módulo de relés, permitiendo suministrar la corriente a su salida cuando estos lo permitan, es decir, a las electroválvulas neumáticas.
- **Módulo de ocho relés.** Su función es el accionamiento de las electroválvulas. A partir de la señal digital de la Arduino (0 o 5 V) se activan o desactivan, permitiendo o cortando el paso de la corriente desde la fuente de alimentación.
- **Arduino Mega 2560.** Se alimenta a 5 V desde el ordenador encargado del gobierno del control. Se emplea como tarjeta de adquisición de Matlab, quedando su empleo reducido a la transformación de los comandos impuestos desde la interfaz de Matlab en señales de 0 o 5 V para efectuar el accionamiento de los relés, o bien recibir los datos pertinentes desde la Arduino Pro Mini con las lecturas actualizadas de los sensores.

En la Figura 4.1 se ilustran todos estos elementos.

## 4.1 Selección de componentes electrónicos y neumáticos



**Figura 4.1: Componentes de partida.** A-Fuente de alimentación. B-Módulo de relés. C-Arduino Mega 2560. D- Válvulas 3/2. E- Regualdor de presión. F- Regulador de caudal.

### 4.1.2. Requisitos de los nuevos componenetes

En aras de dotar al prototipo de la funcionalidad definida en el Capítulo de **Introducción**, son necesarios nuevos componentes, cuyas características y requisitos se definen a continuación.

#### 4.1.2.1. Requisitos neumáticos

- **Presión.** Los nuevos componentes han de soportar la presión de trabajo (2 bares), con un margen de seguridad del 50 %. Es por ello que se seleccionan dispositivos neumáticos capaces de resistir al menos 3 bares.
- **Caudal.** A partir de la herramienta de diseño Inventor se halla el volumen de los conductos de aire,  $5349,5 \text{ mm}^3$ . Experimentalmente, se evalúa el tiempo que se demora la carga completa de las cámaras, alcanzando un resultado de, aproximadamente 25 ms. Con estos datos, se fija un caudal de trabajo de 0.214 L/s.

Acorde con esta filosofía, el circuito neumático ha de ser capaz de transportar el caudal de trabajo, lo que, con las características del compresor utilizado (165

## **4.1 Selección de componentes electrónicos y neumáticos**

---

L/min), supone un ajuste del regulador de entre el 5 y el 10 %. De nuevo, aplicando un factor de seguridad, el límite inferior de caudal que han de ser capaces de resistir se establece en 0.5 L/s.

- **Conectividad.** Los nuevos dispositivos neumáticos han de adaptarse a las conexiones que admiten los existentes. Es por ello que han de disponer de un adaptador para la inserción del tubo de 5 mm de diámetro.

### **4.1.2.2. Requisitos eléctricos**

- **Alimentación.** Los nuevos componentes han de funcionar a la tensión de la fuente disponible, esto es, a 12 V. Además han de soportar la corriente que esta fuente, en las condiciones del circuito, imponga sobre ellos.

### **4.1.2.3. Requisitos adicionales**

- **Conectividad.** Los nuevos dispositivos neumáticos han de adaptarse a las conexiones que admiten los existentes. Es por ello que han de disponer de un adaptador para la inserción del tubo de 5 mm de diámetro.
- **Tamaño.** Con el fin de utilizar la estación de trabajo disponible es necesario adquirir unas válvulas de mínimo tamaño debido a la falta de espacio en la misma.
- **Comunicaciones.** El dispositivo encargados del control del sistema neumático y el de las lecturas de los sensores han de poder comunicarse, alámbrica o inalámbricamente (I2C, SPI, Serie, Bluetooth, etc.).

La Tabla 4.1 resume los requisitos previamente citados.

### **4.1.3. Selección de los nuevos componentes**

Teniendo estos requisitos en consideración, se llevó a cabo la búsqueda y selección de cada componente, dando lugar al siguiente resultado:

## 4.1 Selección de componentes electrónicos y neumáticos

Neumáticos	Eléctricos	Adicionales
<ul style="list-style-type: none"><li>• 3 bares</li><li>• 1 L/s de caudal</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 12 V</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Neumática con conectividad de 5 mm de diámetro</li><li>• Tamaño reducido</li><li>• Comunicaciones alámblicas o inalámbricas</li></ul>

Cuadro 4.1: Requisitos de los componenentes Hardware.

### 4.1.3.1. Componentes del circuito neumático

#### ■ Válvulas VDW20BZ1D.

Como ya se ha mencionado previamente, es necesaria la adquisición de cinco válvulas 2/2 para suplir la incapacidad de las 3/2 de alcanzar un estado de cierre, puesto que los estados posibles son de apertura, bien al aire o bien a presión.

Se ha de realizar una amplia búsqueda en el catálogo de SMC y consultar a sus expertos, con el fin de cumplir con la mayor cantidad posible de requisitos, siendo estos, en orden descendente de prioridad:

- Orificio de salida M5, a fin de poder ser acoplado a las válvulas existentes.
- Una tensión de accionamiento de 12 V.
- Pequeño tamaño, a fin de ser montado fácilmente en la estación disponible.
- Plazo de entrega corto, a fin de no retrasar la planificación establecida.

Tras analizar las alternativas del catálogo, únicamente es posible garantizar los dos requisitos más prioritarios con el modelo VDW20BZ1D (Figura 4.2). El tamaño es demasiado grande, suponiendo esto una ampliación de la estación. Además, el plazo de entrega de las válvulas se extiende hasta un mes y medio, lo que supone un inconveniente en la continuidad del trabajo.

#### ■ Elementos adicionales para el circuito neumático.

El circuito neumático necesita de tubos, acoplados a las válvulas y a los reguladores de caudal y presión.

## 4.1 Selección de componentes electrónicos y neumáticos

---



**Figura 4.2: Válvula VDW20BZ1D.** Esta válvula 2/2 irá acoplada a las 3/2 existentes.

A fin de introducir o extraer aire de las válvulas son necesarios rácores, adquiridos en codo por el método de montaje elegido para las nuevas válvulas, que irán con el codo direccionado hacia las válvulas 3/2 situadas en un nivel inferior de la estación. El modelo de estos rácores es KQ2L04-M5A.

También es necesario el tubo de 5 mm de diámetro que sirve de conductor del fluido entre los diferentes elementos del circuito neumático.

A partir de estos componentes y de los elementos neumáticos de partida definidos en Componentes de partida, se llega al circuito neumático esquematizado en la Figura 4.3.

### 4.1.3.2. Componentes Hardware

- **Módulo de dos relés.**

El accionamiento de las diez valvulas necesarias para controlar las cinco cámaras del robot se lleva a cabo mediante diez relés. Como ya se ha comentado en el apartado de Componentes de partida, previamente se disponía de ocho, por lo que únicamente es necesario comprar un módulo de dos relés (Figura 4.4), con similares características a los ya existentes.

- **Arduino Pro Mini.**

Con el fin de facilitar el movimiento del robot, así como de evitar problemas de cables demasiado extensos, se decide emplear un sistema de tamaño reducido embebido en el prototipo.

#### 4.1 Selección de componentes electrónicos y neumáticos

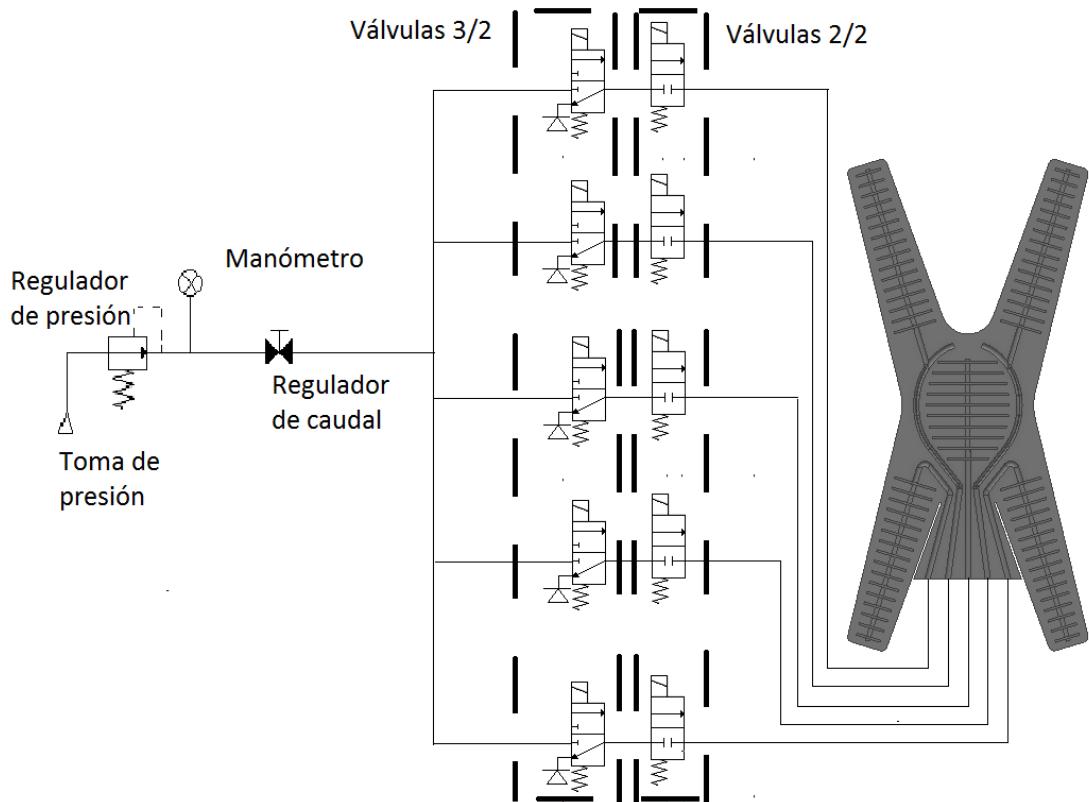


Figura 4.3: Circuito neumático.

La funcionalidad de este sistema consiste en la lectura de los sensores del prototípo, lo que supone su primer requisito: ha de tener la capacidad de medir voltaje, es decir, ha de disponer de cinco entradas analógicas, al menos.

Puesto que el microcontrolador encargado del control del robot se encuentra en la estación de trabajo, junto al ordenador de mando, ambos dispositivos han de tener la capacidad de comunicación entre sus funcionalidades, bien alámbrica o bien inalámbrica (SPI, I2C, Serie, Bluetooth, etc.).

Otro requisito de gran importancia para este nuevo microcontrolador es el peso y el tamaño, puesto que lo ha de soportar el robot y, como se ha explicado en el capítulo de **Introducción**, los *soft robots* cuentan con el inconveniente de la capacidad de carga.

Siguiendo con estos tres criterios de selección, se decide emplear una Arduino Pro Mini (Figura 4.5), capaz de leer hasta ocho medidas analógicas y con las mismas

## 4.1 Selección de componentes electrónicos y neumáticos



Figura 4.4: Módulo de relés.

comunicaciones alámbricas con las que cuenta la Arduino Mega 2560.

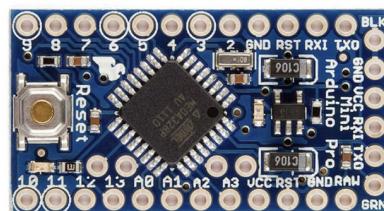


Figura 4.5: Arduino Pro Mini.

Se alimenta desde dicha Arduino Mega a 5 V y se comunica con esta mediante el protocolo de comunicación I2C.

La selección de este protocolo se toma por motivos del Software, como se explicará en el siguiente apartado.

- **Sensor flexible resistivo.**

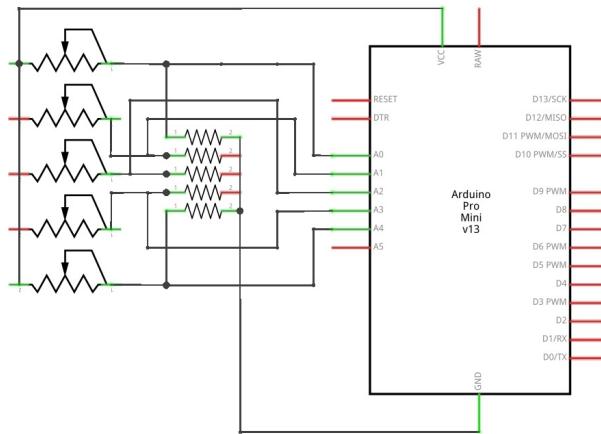
En el capítulo de **Introducción** se definieron los objetivos de este proyecto, principalmente el empleo de realimentación para controlar el prototipo caminante. Siendo dicho prototipo a controlar un *soft robot*, y considerando las características del mismo, los elementos indicados para dicha realimentación han de medir la deformación. Es por ello que se utilizan sensores de flexión.

Como se ha explicado previamente, cuando se explicaba el método de implementación de los sensores en el capítulo de **Diseño y fabricación**, el empleo de los

## 4.1 Selección de componentes electrónicos y neumáticos

sensores implica el de un divisor de tensión, para medir el voltaje por medio de una entrada analógica en la Arduino Pro Mini.

El esquema de conexión que se ha seguido con los sensores, por tanto, es el mostrado en la Figura 4.6



**Figura 4.6: Esquema de conexión de los sensores.** El divisor de tensión permite obtener una lectura analógica recibida por la Arduino-Mini.

Dicho divisor de tensión ha de ser diseñado adecuadamente para que la medida resulte lo más precisa posible.

Teniendo en cuenta que la impedancia de entrada a la Arduino se puede considerar infinita ( $10 M\Omega$ ), se considera que la variación del valor de tensión no va a variar con respecto a las demás conexiones.

Se ha de maximizar la sensibilidad de la medida, esto es, la variación de la medida con respecto a la resistencia del divisor de tensión.

La caída de tensión por la resistencia constante viene representada por la Ecuación 4.1, mientras que su derivada con respecto a la resistencia variable, función a maximizar, viene representada por la Ecuación 4.2.

$$U_R = \frac{V \cdot R}{R + R_x} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial U_R}{\partial R_x} = \frac{V \cdot R}{(R + R_x)^2} \quad (4.2)$$

## **4.1 Selección de componentes electrónicos y neumáticos**

---

Para maximizar la sensibilidad de la medida, no hay más que derivar con respecto a la resistencia constante, cuyo valor se quiere hallar. El resultado de esta derivación aparece en la Ecuación 4.3.

$$\frac{\partial^2 U_R}{\partial R_x \partial R} = V \cdot \frac{Rx - R}{(R + Rx)^3} \quad (4.3)$$

Por lo que para maximizar la sensibilidad de la medida se debe maximizar 4.2, para lo que 4.3 se debe igualar a cero. El punto crítico sería  $R = Rx$ . Además, analizando la monotonía de la función, se obtiene que es un máximo.

Por tanto se escoge un valor de resistencia de  $22 k\Omega$ , valor de la resistencia variable cuando el sensor está en su posición plana.

### **■ Ordenador.**

Con el fin de facilitar al usuario el empleo y el control del prototipo, se ha llevado a cabo el desarrollo de una interfaz con diferentes funcionalidades a seleccionar por el usuario.

A causa de esta circunstancia, es necesario el empleo de un ordenador, que irá conectado en todo momento a la Arduino Mega, mediante el puerto serie. Como se expondrá a continuación, es en este dispositivo, a través de Matlab, en el que se ejecuta toda la programación. Por tanto, es indispensable para el funcionamiento del sistema.

Una vez definidos los elementos necesarios para el control del dispositivo, se muestra un esquema del circuito electrónico con las conexiones de los mismos en la Figura 4.7.

## 4.1 Selección de componentes electrónicos y neumáticos

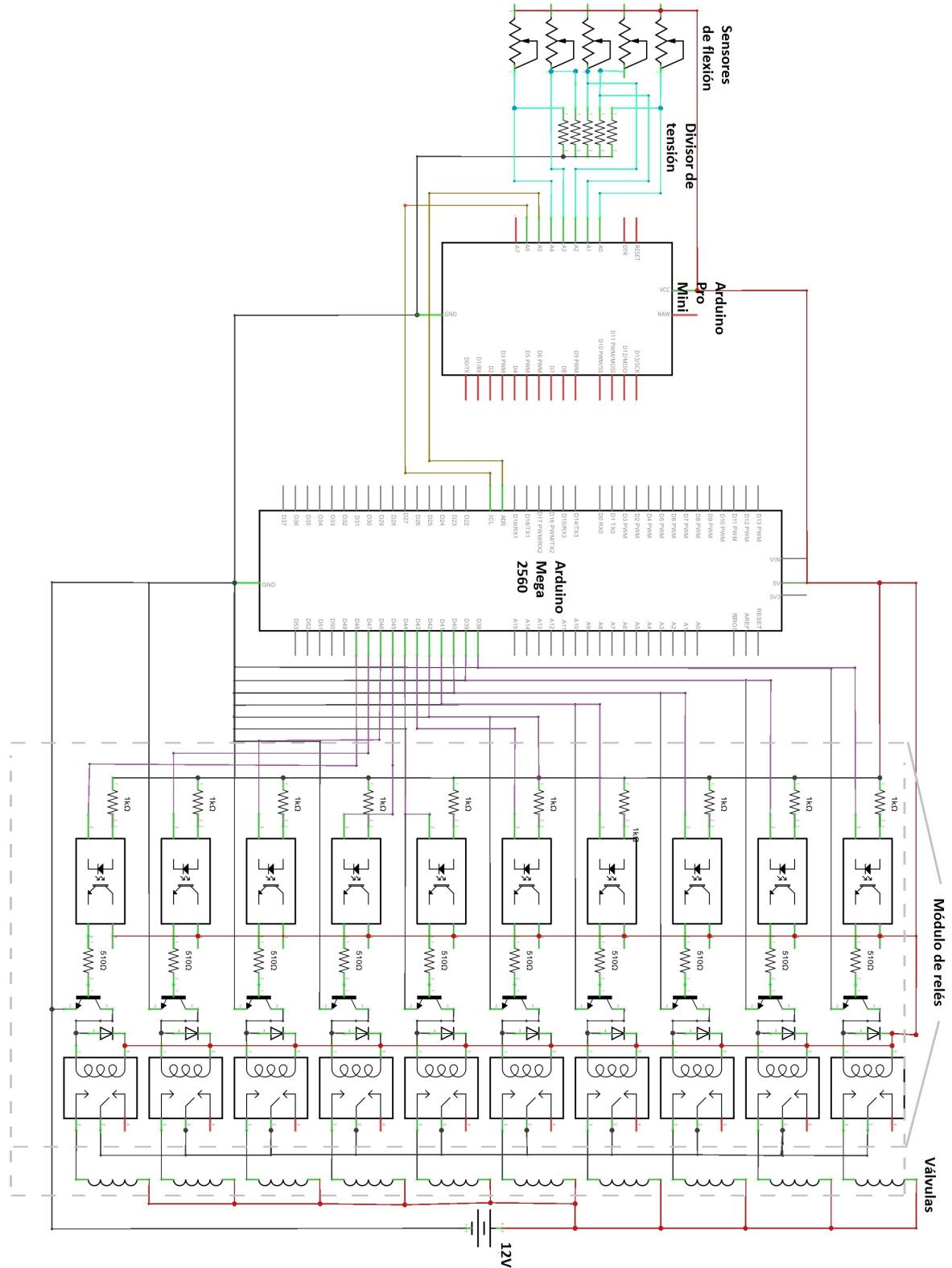


Figura 4.7: Esquema del circuito electrónico.

## **4.2. Arquitectura Software.**

En este proyecto se ha desarrollado el diseño del prototipo y la implementación del hardware y software necesario para llevar a cabo el control del mismo. Es por ello que ha tenido lugar la programación de los distintos microcontroladores empleados para tal fin y el desarrollo de la interfaz gráfica que permite ordenar los comandos necesarios para la ejecución de distintas tareas.

### **4.2.1. Distribución de tareas**

Como se ha presentado previamente en el apartado de Selección de componentes electrónicos y neumáticos, se dispone de dos microcontroladores con tareas propias de sus capacidades.

#### **4.2.1.1. Arduino Pro Mini**

Su función consiste en la toma de datos de voltaje de los sensores de flexibilidad, para cuantificarlo en una medida concreta de deformación.

Además, como se explicará en los próximos apartados, debe transmitir la información solicitada por el maestro, la Arduino Mega 2560, mediante el protocolo I2C.

#### **4.2.1.2. Arduino Mega 2560**

Su principal cometido es servir de intermediario entre el hardware y el programa de control de Matlab. Se utiliza como tarjeta de adquisición de Matlab, con el que se comunicará por el puerto serie del ordenador. A partir de los comandos obtenidos desde este programa, se encargará de accionar las salidas que resulten oportunas.

Además, servirá de maestro en la comunicación I2C con la Arduino Pro Mini, solicitando el envío de los datos actualizados de los sensores, y se los transmitirá al programa de control de Matlab.

## **4.2 Arquitectura Software.**

---

De esta forma, se aprovechan las ventajas de la velocidad de procesamiento de Matlab.

### **4.2.1.3. Matlab R2015b**

Se trata del núcleo del control de este trabajo. En él se ejecutan los algoritmos necesarios para actuar sobre las cámaras del prototipo.

Una vez definidas las actuaciones sobre los relés, se encargará de su transmisión a la Arduino Mega mediante el puerto serie, de forma que esta pueda activar o desactivar las señales.

Además, a través de la GUI de Matlab, se ha desarrollado una interfaz gráfica que permite la actuación sobre el prototipo de forma sencilla e intuitiva, cuyas diversas funcionalidades se explicarán a continuación.

### **4.2.2. Interfaz gráfica**

Se trata del entorno gráfico utilizado para configurar la actuación del prototipo, mediante una algoritmia y un control previo.

Se ha llevado a cabo una interfaz que englobe tanto el control por tiempo, es decir, sin realimentación, como el control a través de los sensores, sin más que seleccionar una técnica u otra.

En ambas técnicas es posible seleccionar el modo deseado, que engloba un conjunto de opciones cuya funcionalidad se define a continuación:

- **Test.** Sirve de comprobación para garantizar el buen funcionamiento de todos los componentes del sistema. Su funcionamiento se define en el próximo capítulo.
- **Caminante.** Consiste en un modo de marcha cuyo funcionamiento se detalla en el próximo capítulo.
- **Ondulante.** Al igual que el anterior, este modo de marcha se describe en el próximo capítulo.

- **Selección de cámara.** Se trata de una funcionalidad de verificación del correcto funcionamiento, al igual que el modo *test*, con la diferencia de la posibilidad de centrar la atención sobre un subsistema concreto.
- **Calibración.** Permite la caracterización de cada robot, debido al carácter pseudoaleatorio del método de la fabricación, pues hay variables muy complejas cuyo control manual no es posible, como es el espesor capa extra aplicada, la capa de sujeción de los sensores o la calidad de la mezcla de silicona.

Como se expondrá en el próximo capítulo, para el control en cadena cerrada del prototipo, tras una reflexión acerca de la mejor opción, se dictamina un control por estados discretos, definiendo un umbral de lectura analógica en el cual estos son válidos. Se consideran cinco estados cualitativos: : completamente lleno (1), casi lleno (3/4), semilleno (2/4), casi vacío (1/4) y vacío (0).

La caracterización que se lleva a cabo en el método de calibración consiste, pues, en la recopilación de los datos de los sensores en las posiciones que, a simple vista, el usuario considere para cada uno de estos estados discretos. Se almacenará entonces el dato de lectura que acontezca en el momento de selección del botón, dato que definirá la media del estado, aplicándose luego el umbral mencionado anteriormente.

Para actualizar los valores de los estados discretos mencionados será necesario seleccionar las cámaras que se quiera actualizar en un menú de cámaras con botones de selección. En la figura Figura 4.8, se observa dicho menú.

Sobre los recuadros de edición de dicha figura, se ha de anotar el número de milisegundos que la cámara debe llenarse de aire (si el número es positivo), o vaciarse (si es negativo).

Una vez calibrado un modelo, se obtienen los datos de dicha calibración, para que no sea necesario volver a realizar este proceso.

- **Nivel de llenado continuo.** Es un modo que permite la verificación del funcionamiento deseado. En la Figura 4.9 se observa la interfaz de este modo de funcionamiento.

## 4.2 Arquitectura Software.

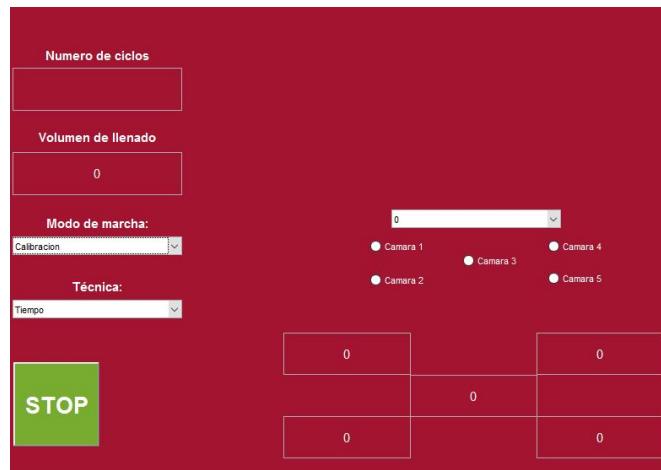


Figura 4.8: Método calibración de la interfaz gráfica.

En los cuadros de edición que simulan las cámaras del robot, se escribe el número de milisegundos que ha de llenarse de aire (si es positivo) o vaciarse (si es negativo).

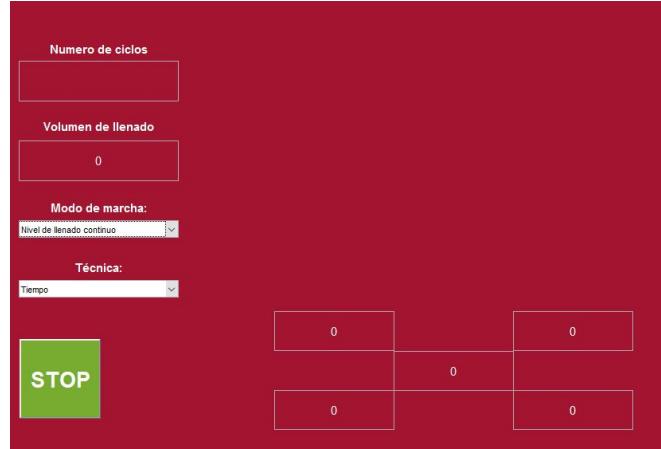


Figura 4.9: Método funcionamiento continuo de la interfaz gráfica.

- **Nivel de llenado discreto.** Al igual que el método anterior, es una técnica de comprobación del funcionamiento.

En los cuadros seleccionables se marcan las cámaras que se quieran verificar y en el menú desplegable, el estado discreto que se pretende alcanzar.

En la Figura 4.10 aparece la interfaz de este modo.

## 4.2 Arquitectura Software.

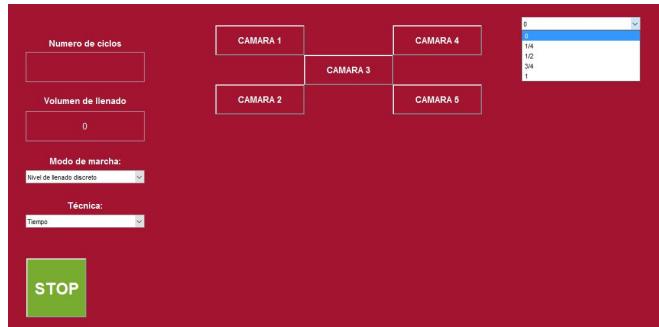


Figura 4.10: Método funcionamiento dicroto de la interfaz gráfica.

En aras de dotar de versatilidad a la interfaz, la programación se ha llevado a cabo de modo que todos los modos de funcionamiento mencionados se puedan usar tanto con la técnica de control de tiempo (sin realimentación) como por control de medida de la deformación (realimentando).

Tal y como se puede observar en las figuras anteriores, aparece un botón de *STOP*, que consiste en un elemento de seguridad que permite la parada en cualquier momento del programa.

Esta parada, debido a la escasez de tiempo que se tarda en hacer un bucle y a la ausencia de bloqueos de proceso en la programación, se ha desarrollado mediante el método de consulta periódica.

La consulta de las variables de la interfaz es, a su vez, por consulta periódica. Producíendose la actualización de sus valores cada 70 ms, aproximadamente, con el fin de no saturar la ejecución de la algoritmia.

Los cuadros de texto editables de *número de ciclos* y *volumen de llenado* controlan las secuencias que se producen. El primero, mediante el número de veces que se repite la misma, mientras que el segundo, únicamente útil cuando se trata con la técnica temporal, para definir el tiempo, en milisegundos, que quiere mantenerse la válvula correspondiente en posición de llenado de las cámaras, y con ello establecer el volumen de llenado.

### 4.2.3. Diseño de clases

Debido a las características y a los requisitos del sistema, se ha tenido que prestar especial atención a la forma de programar los algoritmos necesarios para el funcionamiento del prototipo.

El código se ha desarrollado en Matlab, con un lenguaje de programación orientado a objetos, por lo tanto las operaciones ejecutadas son estructuradas y secuenciales.

Es por ello que no se ha realizado ningún bloqueo del proceso, y tampoco ninguna interrupción debido a la ausencia de necesidad para el empleo de las mismas, siendo el empleo de consulta periódica un método de Entrada/Salida perfectamente aceptable.

En Matlab, se han desarrollado distintos ficheros en la programación del sistema, algunos contienen la definición de las clases empleadas, mientras que otros se utilizan para el control global del sistema o para funcionalidades específicas. Estos ficheros son:

- **controlRobot.m** Es el nucleo de la programación. Contiene la función principal, cuyo cometido es consultar periódicamente las distintas funciones u operaciones.
- **interfaz.m** Contiene la funcionalidad de la interfaz. Contiene gran diversidad de funciones que permiten el correcto funcionamiento de dicho entorno gráfico, así como las entradas y salidas que se haya considerado necesario compartir con *controlRobot*.
- **interfaz.fig** Contiene los elementos gráficos con que cuenta la interfaz y la distribución espacial de los mismos.
- **camara.m** Es una clase cuyos atributos permiten su correcta caracterización (pienes de las válvulas que la controlan, acción actual sobre la misma, acción anterior, deformaciones ideales para los estados discretos existentes, deformación actual, etc.). Sus atributos permiten la correcta escritura a las válvulas correspondientes en función de la acción deseada.
- **robot.m** Es una clase entre cuyos atributos hay cinco objetos de clase *camara*. Permite la correcta configuración de los microcontroladores y la comunicación adecuada entre los mismos.

## 4.2 Arquitectura Software.

- **marcha.m.** Es una clase entre cuyos atributos hay un objeto de clase *robot*. Permite la correcta ejecución de los modos de funcionamiento mencionados en el apartado anterior (distintos modos de marcha, calibración, etc.).

En la Figura 4.11 aparece un esquema URL de los contenidos de cada clase y la relación entre las mismas.

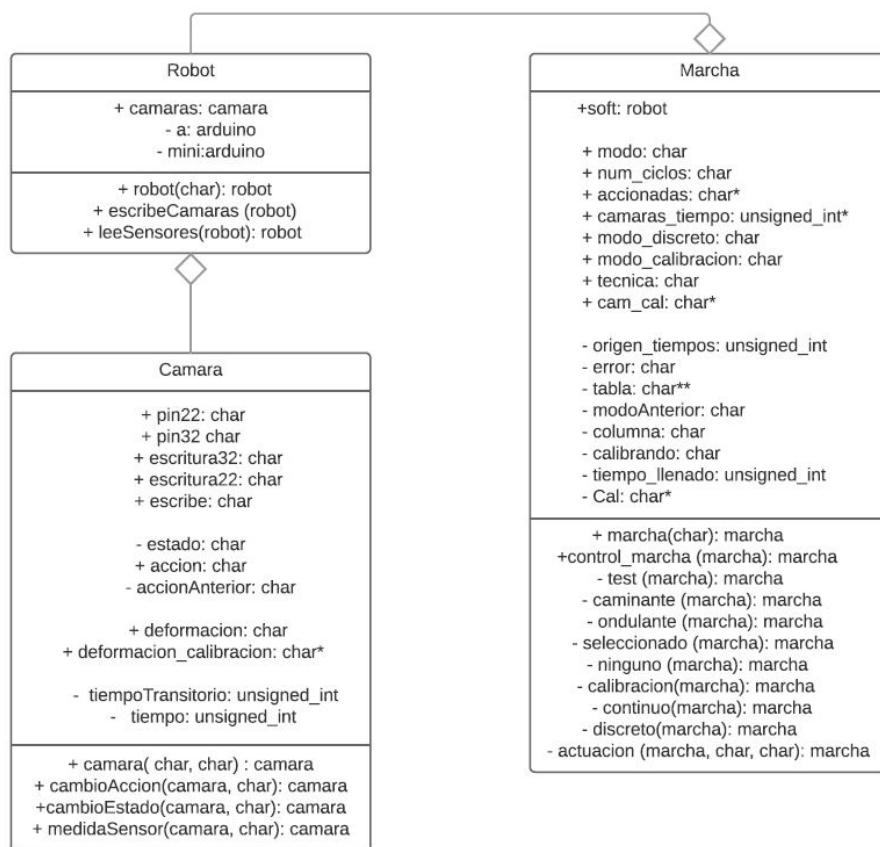


Figura 4.11: Diagrama URL de las clases de la programación.

La programación de la Arduino Pro Mini se ha llevado a cabo mediante una consulta periódica en cada bucle del valor de los sensores.

### 4.2.4. Comunicación

Debido al empleo de dos microcontroladores diferentes, que han de interactuar entre sí de manera rápida y eficaz, es necesario establecer un protocolo de comunicación.

Ambos microcontroladores se comunican utilizando el protocolo I2C. La elección de este protocolo se basa en el medio de programación utilizado: Matlab.

En el apartado de Distribución de tareas se ha comentado el empleo de Matlab como núcleo del control y que la placa Arduino Mega 2560 se utiliza como tarjeta de adquisición de Matlab, con el que se comunica a través del puerto serie.

La programación de un puerto serie de la Arduino Mega desde Matlab dificulta la misma, haciendo necesario la creación de librerías de Matlab o el empleo de Simulink. Es por ello que se toma el protocolo I2C como base, también considerando posibles futuras ampliaciones del proyecto que implicasen la necesidad de relación con varios esclavos y un sólo maestro (teleoperación a través de un guante, control de varios robots en paralelo, etc).

Esta transmisión de información se produce por solicitud de información cada 70 ms aproximadamente. En el momento de solicitud se produce una interrupción en el esclavo que implica la transmisión de 2 Bytes de información.

El rango de medida máximo de los sensores se extiende en la práctica desde 150 hasta 466, lo que implica un envío de más de 1 *Byte* por cada sensor. Es por ello que es necesario medir los sensores en una variable de 2 *Bytes* (*uint16\_t*) y separar dicha variable en dos palabras distintas, a través del uso de la enmascaramiento de la parte de la variable inicial no utilizada y la operación de desplazamiento.

Por ejemplo, si el valor del voltaje de un sensor se almacena en la variable *uint16\_t lectura*, y se quiere guardar en un vector de longitud dos de variables *uint8\_t, transmision*, será necesario realizar las siguientes operaciones:

```
transmision[0] = (lectura[0] & 0x00FF);
```

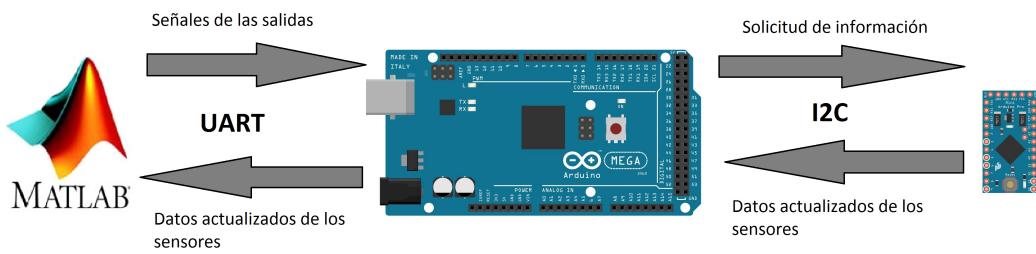
```
transmision[1] = (lectura[1] & 0xFF00 ) >> 8;
```

## 4.2 Arquitectura Software.

Entre la Arduino Mega y Matlab también se efectúa una transmisión de información, en esta ocasión a través del puerto serie, con los siguientes datos:

- **Desde Matlab** Se transmiten las señales de los relés que controlan las válvulas con el fin de que la Arduino Mega actúe sobre ellos.
- **Desde la Arduino Mega.** Se comunica el valor de los sensores recogido desde la comunicación I2C con la Arduino Pro Mini.

En la Figura 4.12 se resumen los datos con que interactúan los distintos dispositivos del sistema.



**Figura 4.12: Comunicación entre los subsistemas.**

# 5

## Control

A fin de poder gobernar los movimientos del *soft robot* que le otorguen la capacidad de marcha, es necesario planificar las secuencias de marcha.

Además, una de las premisas que este trabajo debía alcanzar es la incorporación de realimentación al sistema. Acorde con esta circunstancia, se ha invertido parte del esfuerzo del trabajo en la selección de la técnica de control más apropiada para el sistema.

A lo largo de este capítulo, se describen las planificaciones de marcha mencionadas y se propone la técnica de control finalmente empleada, así como las premisas que han conducido a ella.

### 5.1. Modos de marcha

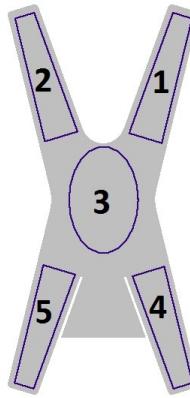
Tal y como se menciona en el Capítulo 4, al presentar la interfaz gráfica, se han desarrollado distintas secuencias que permiten el avance del prototipo a partir del llenado de sus cámaras.

A fin de llevar a cabo una programación en la que dichas secuencias sean lo más adaptables y flexibles posibles, consiguiendo así simplificar la algoritmia, con el tiempo de procesamiento que conlleva su ejecución, se introducen mediante tablas, cuyas filas

constituyen las cámaras del robot y las columnas los instantes de tiempo en que el robot debe encontrarse con la deformación que las celdas de la tabla predigan.

Además, con esta metodología es sencilla la programación de nuevas marchas, lo que permite afianzar las conclusiones acerca de la eficacia de la técnica de control en cadena abierta frente a cadena cerrada.

En todos los modos de marcha se utiliza una referencia numérica de las cámaras del robot, que sería la representada en la Figura 5.1.



**Figura 5.1:** Referencia numérica de las cámaras del robot.

A continuación, se describen los modos de marcha que se han llevado a cabo a lo largo del desarrollo de este trabajo.

### 5.1.1. Test

Se trata de una secuencia cuya finalidad es garantizar el buen funcionamiento de todas las cámaras, así como de los componentes físicos, tanto neumáticos como electrónicos, que gobiernan su accionamiento.

La representación de la tabla previamente mencionada daría lugar a una matriz  $5 \times 5$ , y depende de la técnica utilizada para realizar esta secuencia. A continuación se representa su aspecto, a la izquierda utilizando la técnica temporal y a la derecha

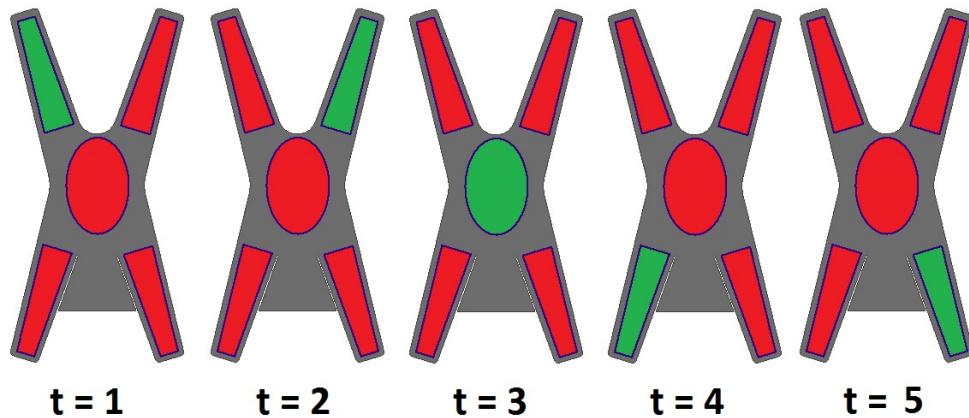
incorporando realimentación.

1	0	0	0	0	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	4	3	2	1
0	0	1	0	0	1	0	4	3	2
0	0	0	1	0	2	1	0	4	3
0	0	0	0	1	3	2	1	0	4

En el caso de la técnica temporal, los unos representan el accionamiento de esa cámara en ese instante, mientras que los ceros, el vaciado de las mismas.

En contraposición, la técnica de bucle cerrado utiliza los estados discretos descritos en el Capítulo 4: lleno(4), casi lleno(3), intermedio(2), casi vacío(1), vacío(0).

Gráficamente se presenta la Figura 5.2, que simula su funcionamiento en la técnica temporal.



**Figura 5.2: Representación gráfica de la secuencia test.** Las cámaras representadas de color rojo corresponden a las vaciadas, mientras que las verdes representan a las cámaras cargadas de aire.

### 5.1.2. Caminante

Este modo de marcha pretende simular la forma de moverse de los animales que lo hacen sobre sus cuatro extremidades. La cámara central simula los abdominales del animal, mientras que las cámaras laterales simulan sus extremidades.

Consiste en mantener la cámara central siempre cargada, dotando así de rigidez al prototipo, mientras que las extremidades se van alternando, tanto en el plano XZ como en el YZ.

En primer lugar el prototipo ha de levantarse, estado que se logra mediante el llenado previo de las extremidades y posterior carga de la cámara central. A continuación se lleva a cabo la secuencia mencionada anteriormente, de forma periódica.

La representación de la tabla de este modo de marcha supone una matriz  $5 \times 4$ , siendo la misma dependiente del método empleado, es decir, de la existencia o no de realimentación. En las matrices siguientes se pueden apreciar ambas tablas. De nuevo, a la izquierda se encuentra la que sigue el método temporal.

1	0	0	0	4	2	2	2
0	0	1	0	2	2	4	2
1	1	1	1	4	4	4	4
0	0	0	1	2	2	2	4
0	1	0	0	2	4	2	2

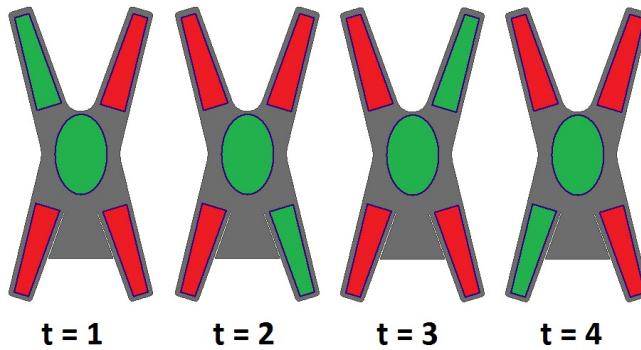
El significado numérico es el mismo que el expuesto en el caso del modo de marcha *test*.

En el caso del método de cierre de la cadena, se decide un vaciado hasta el estado intermedio a fin de no perder estabilidad en el prototipo. De hecho, en el caso temporal los tiempo se establecen tratando de cumplir este objetivo.

La representación gráfica de esta secuencia sería la mostrada en la Figura 5.3.

### 5.1.3. Ondulante

Esta secuencia trata de mover al prototipo en forma de impulsos, consiguiendo que el mismo avance arrastrándose. Es por esta circunstancia que la secuencia ha de conseguir la carga del robot desde la parte trasera hacia la delantera, para luego descargarse en el mismo sentido.



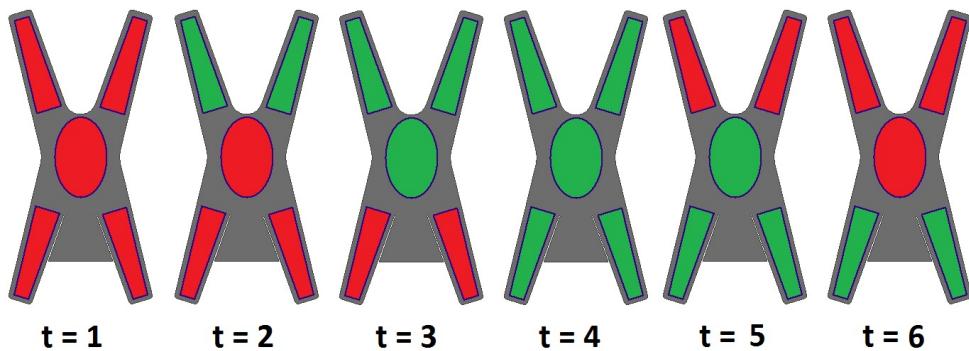
**Figura 5.3:** Representación gráfica de la secuencia caminante. Las cámaras representadas de color rojo corresponden a las vaciadas, mientras que las verdes representan a las cámaras cargadas de aire.

La representación en forma de tabla conforma una matriz de  $5 \times 6$ , en caso de control temporal y de  $5 \times 10$ , en el caso de control por realimentación. Se representa a continuación, con la matriz temporal situada a la izquierda.

0 1 1 1 0 0	0 1 2 3 4 3 2 1 0 0
0 1 1 1 0 0	0 1 2 3 4 3 2 1 0 0
0 0 1 1 1 0	0 0 1 2 3 4 3 2 1 0
0 0 0 1 1 1	0 0 0 1 2 3 4 3 2 1
0 0 0 1 1 1	0 0 0 1 2 3 4 3 2 1

En el caso de control por realimentación se produce la secuencia de carga y descarga significativamente más lentamente, lo que permite llevar a cabo una mejor sincronización de las cámaras.

La Figura 5.4 muestra la representación gráfica de este modo de marcha, en el caso de control temporal.



**Figura 5.4:** Representación gráfica de la secuencia ondulante. Las cámaras representadas de color rojo corresponden a las vaciadas, mientras que las verdes representan a las cámaras cargadas de aire.

## 5.2. Control

El alcance de este trabajo alberga como objetivo principal el cierre del lazo de control. Siguiendo esta filosofía, y a fin de tener la capacidad de evaluar los resultados obtenidos comparativamente, se ha analizado tanto la técnica de control temporal como el empleo de realimentación.

En los primeros capítulos del presente documento se explicaban las ventajas de los *soft robots*, así como la escasa presencia de sensores en los mismos debido a que la electrónica no es flexible, ocasionando una pérdida de interés su implementación en estos robots por la disminución de las ventajas mencionadas.

Acorde con esta filosofía, la implementación de los componenentes electrónicos, tanto los sensores como el microcontrolador asociado para medir y enviar sus lecturas, se ha estudiado detenidamente, a fin de minimizar e, incluso, evitar las pérdidas de beneficios.

La incorporación de los sensores de flexión no supone, pues, un inconveniente en el prototipo, pues no le impide realizar los movimientos que permiten su avance. Una situación idéntica sucede con el microcontrolador, localizado sobre los tubos de entrada a fin de evitar fallos o inconvenientes en la deformación de las cámaras.

Bajo esta premisa se pueden predecir los resultados de la comparación mencionada, pues, la realimentación no solo no perjudica al sistema en el aspecto de incorporación

de componentes, sino que además permitirá la optimización de los modos de marcha y una ejecución significativamente más eficaz.

### **5.2.1. Control en cadena abierta**

El control sin realimentación se lleva a cabo mediante cálculos temporales de forma experimental, actuando sobre las válvulas periódicamente, en instantes de tiempo fijados por el usuario.

Bajo esta filosofía, el usuario introduce en la interfaz gráfica el tiempo de actualización, denominando el período entre dos actuaciones consecutivas sobre los relés. En la Figura 5.5 se muestra el flujo del algoritmo de control, para asimilar mejor esta exposición.

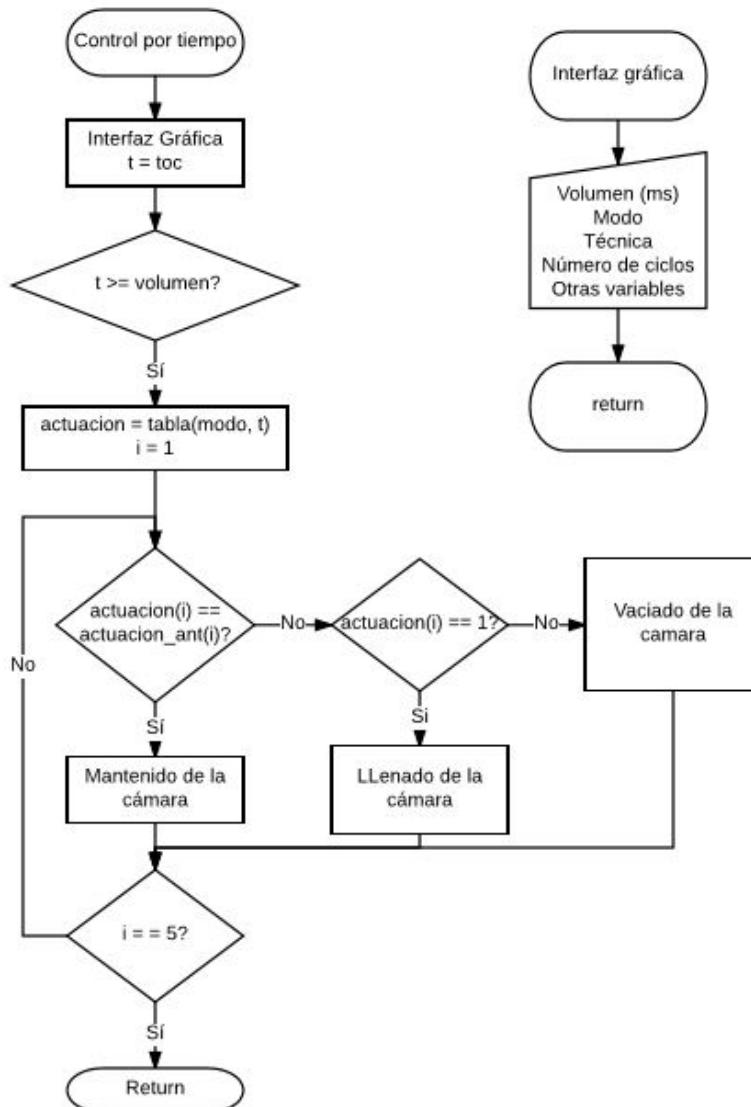


Figura 5.5: Diagrama de flujo del control en cadena abierta.

Este parámetro (tiempo) tiene un carácter muy relevante en el rendimiento de los modos de marcha. Es, de hecho, la optimización de los parámetros caudal-tiempo-presión lo que garantiza una buena ejecución del modo de marcha.

Los resultados de este control se expondrán en el Capítulo 7, siendo los esperados. El control en cadena abierta implica la ausencia de coordinación entre las extremidades del robot y la secuencia caminante, debido a la falta de idealidad, ya que las cámaras

necesitan tiempos de carga dispares, así como de descarga. En el modo de marcha ondulante este problema mantiene su presencia, aunque en menor medida.

### **5.2.2. Control en cadena cerrada**

El control con realimentación se lleva a cabo utilizando una técnica de control discreta.

En todo sistema continuo, el grado de precisión está en relación inversa con el tiempo de muestreo: cuando el segundo aumenta, el primero disminuye, y viceversa.

Extendiendo este razonamiento, un sistema actuado de forma continua implicará, en general, un mejor gobierno de sus variables y, con ello, un mayor rendimiento en sus salidas.

Derivado de estas premisas, se puede concluir que un control PID sería más adecuado para el control efectivo del robot, puesto que se contaría con *infinitos estados discretos*, en lugar de únicamente cinco, como de hecho se cuenta.

Sin embargo, con el sistema de actuación no es posible llevar a cabo un control continuo, debido a las características y restricciones de los actuadores.

Uno de los motivos se deduce de los estados que pueden alcanzar tanto las válvulas como los relés: todo o nada. Se actúan imponiendo sobre ellos 0 V (nada) o 5 V(todo), en el caso de los relés o 12 V (todo) en el caso de las válvulas.

De esta circunstancia deriva las posibilidades de salida del sistema: expulsar aire, mantener aire o vaciar aire. No es posible expulsar o inyectar aire en función del error existente en la deformación con respecto a la deformación de referencia.

Se podría considerar la opción de convertir la salida discreta en una salida continua, de un modo similar a como funciona un convertidor, es decir, manipulando el ciclo de trabajo de un interruptor, que en este caso sería el relé.

Sin embargo, tanto los relés como las válvulas son dispositivos mecánicos, cuyo tiempo de respuesta no es del todo reducido y que pueden ser quemados por intentar

utilizarlos a altas frecuencias.

Bajo esta circunstancia, existe la necesidad de emplear estados discretos, definidos cualitativamente en función del operario que realice la calibración del prototipo.

Estos estados (lleno, casi lleno, intermedio, casi vacío y vacío) son los que establecen los modos de marcha previamente mencionados en el apartado 5.1.

Como se explicó en el Capítulo 4, el control se lleva a cabo mediante consulta periódica mediante la llamada a la función de control. Esta función llevará a cabo otra consulta, a su vez, consistente en la determinación del error de la deformación en cada una de las cámaras.

En el momento en que las cámaras, todas y cada una de ellas, cuenten con un error de deformación menor que 20, en valor analógico (en voltaje correspondería con 0.098 V), se procede al siguiente tramo de la secuencia de marcha.

Esta premisa es importante, puesto que va a suponer un aumento de coordinación muy significativo, lo que implicará una mejora notable en la secuencia caminante, cuya mayor imperfección era esta característica.

Este procedimiento de control determina un gobierno del sistema preciso, y una respuesta rápida y eficaz, con resultados satisfactorios en los ensayos.

# 6

## Planificación y presupuesto

El presente proyecto cubre un total de diez meses: desde finales de septiembre hasta finales de julio. A lo largo de este período de tiempo se han ido desarrollando las tareas previamente definidas a fin de lograr los objetivos impuestos.

Debido al carácter de desarrollo continuo con que cuenta este trabajo, tratándose de enmendar los errores de forma permanente, existen tareas llevadas a cabo a lo largo de todo el proyecto, como son el diseño y la fabricación del robot.

La fragilidad del robot durante los ensayos, no en sentido literal, sino en el sentido de deformación plástica debido a la aplicación de una presión, un caudal excesivo o un volumen de aire demasiado elevado, ha obligado a la fabricación de un elevado número de prototipos, y exclusivamente a fin de determinar si el diseño establecido producía mejoras.

Acorde con esta circunstancia, para obtener la conformidad con cada diseño son necesarios varios ensayos con distintos prototipos, debido también a que el mínimo error en el proceso de fabricación puede provocar un resultado indeseado, no siendo responsable, en este caso, el diseño.

En este punto cabe señalar que la obtención de un nuevo prototipo requiere de entre uno y dos días, debido al número de pasos que es necesario llevar a cabo y al tiempo de curado de la silicona.

## **6.1 Estructura y descomposición del proyecto**

---

Los cambios de diseño conllevan un tiempo de obtención de un nuevo prototipo aún mayor, ya que, además del tiempo de fabricación, hay que contar con el tiempo de concepción y diseño del nuevo modelo (entre uno y dos días) y el de impresión 3D (un día).

Teniendo lo anterior en cuenta, se puede predecir un consumo temporal, económico y técnico significativo en estos procesos.

### **6.1. Estructura y descomposición del proyecto**

La EDP del proyecto permite dividir el mismo en paquetes de trabajo a fin de percibir de forma directa las tareas necesarias para conseguir los objetivos impuestos.

En este trabajo, se han agrupado dichas tareas en subsistemas a fin de lograr una estructuración que sirviera de base para la programación de las tareas mediante el diagrama de Gantt.

Estos subsistemas son:

- Dirección. Este subsistema engloba tanto la definición como el seguimiento de la planificación y de los objetivos parciales del trabajo.
- Estudios y formación. Corresponde a este sistema la recopilación de la información necesaria para llevar a cabo las tareas del trabajo.
- Robot. Se de todos los trabajos necesarios en relación con el prototipo caminante.
- Sistema de accionamiento, encargado de dotar al robot de la fuerza, en forma de aire, necesaria para moverse.
- Sistema de control, encargado del gobierno de las señales que permiten la actuación del sistema de accionamiento.
- Integración. Son todas las tareas necesarias para permitir el funcionamiento del sistema global.

La EDP del proyecto llevado a acabo se encuentra en la Figura 6.1.

## 6.1 Estructura y descomposición del proyecto

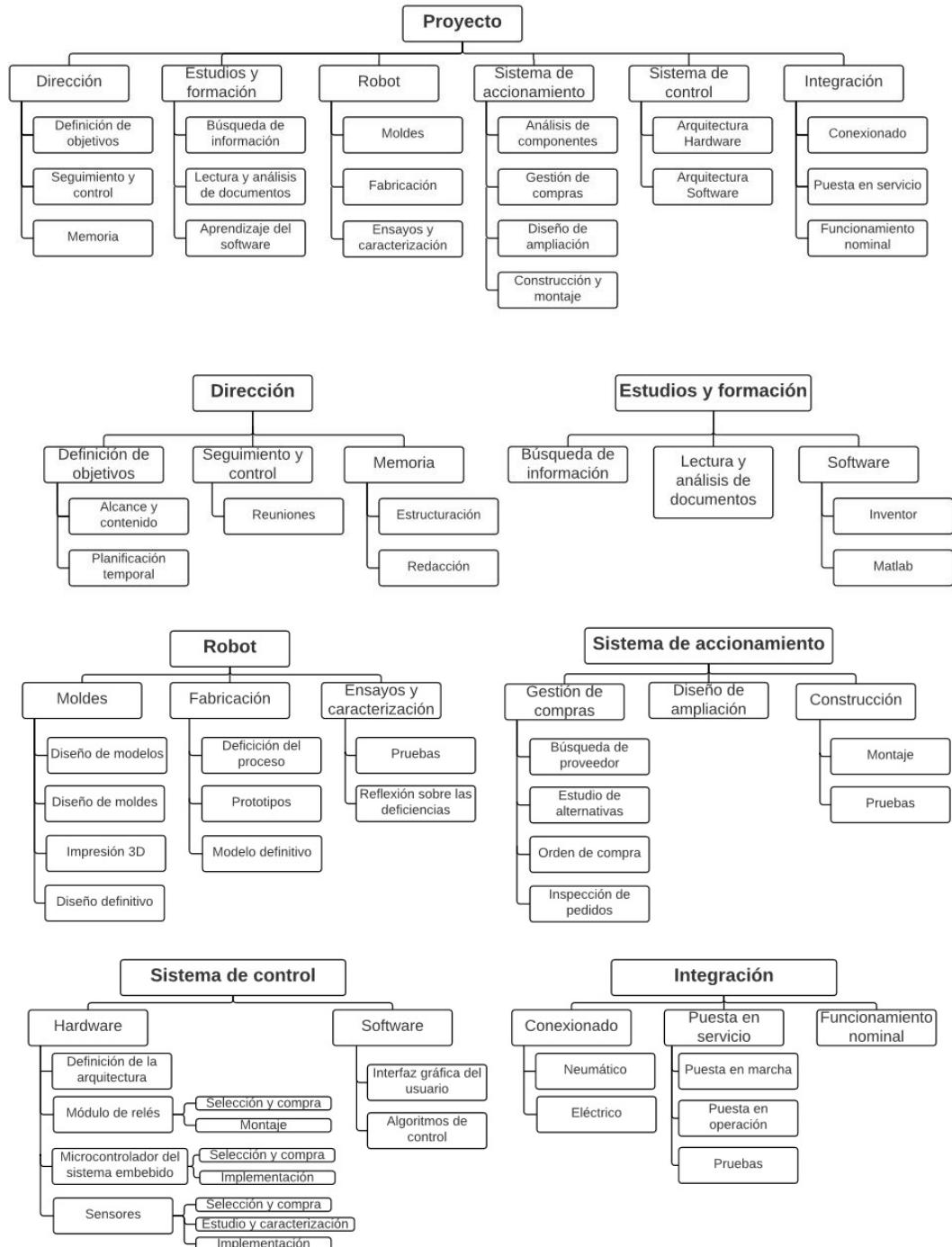


Figura 6.1: Estructura y descomposición del proyecto.

### 6.2. Diagrama de Gantt

El trabajo realizado se puede descomponer en siete etapas:

- Una primera fase de definición del proyecto y sus objetivos.
- Una vez superada esta etapa, se comienza el periodo de formación, mediante la búsqueda y lectura de artículos técnicos que permiten un acercamiento a la robótica flexible, aumentando el entendimiento y, con ello, el grado de alcance, y permitiendo definir las tareas que llevarán a los objetivos.

Se establece entonces una planificación de las tareas, definiendo las interconexiones necesarias y el orden de prioridad de las mismas, y una programación aproximada de éstas.

- A continuación se procede al diseño del modelo y del molde, continuando con la impresión en 3D de este último y la fabricación del robot.

Tras ser fabricado, se realizan los ensayos cuyos resultados dan pie al desarrollo de unas conclusiones que permiten comenzar este paso de nuevo.

Paralelamente a esta tarea se van desarrollando otras, las que siguen a esta etapa.

- Se desarrolla el software del trabajo: la interfaz gráfica del usuario, previa documentación y aprendizaje de la interfaz GUIDE de Matlab, así como los algoritmos de control, tanto en cadena abierta como en cadena cerrada.

- Paralelamente, se seleccionan y compran los componentes físicos necesarios.

Conviene mencionar que las válvulas adquiridas, parte del circuito neumático, llevan un tiempo de entrega de cinco semanas, lo que impide el dificultar la continuidad del trabajo.

- Se estudia, también paralelamente el empleo de los sensores, dimensionando las resistencias necesarias para tal empleo. Se caracteriza también el sensor y se incorpora al prototipo.

A continuación se diseña, construye y monta la ampliación de la estación y el sistema embebido.

### 6.3 Presupuesto

- La redacción se produce al finalizar el proyecto.

Todas estas etapas se ilustran en el diagrama de Gantt de la Figura 6.2.

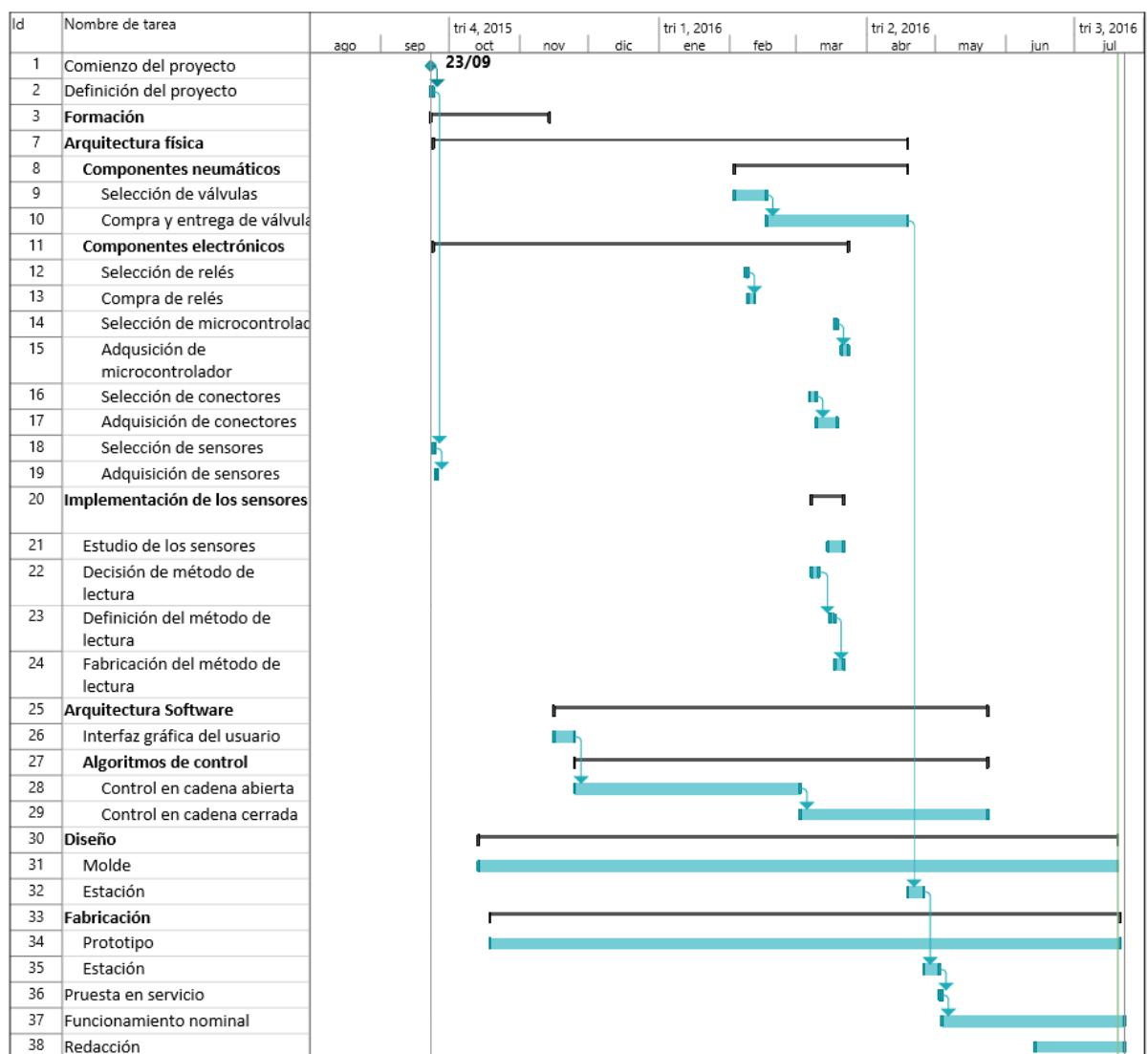


Figura 6.2: Diagrama de Gantt.

### 6.3. Presupuesto

En la Tabla 6.1 se muestra el presupuesto de este proyecto.

### **6.3 Presupuesto**

Partida	Concepto	Unidades	Precio unidad (€)	Importe
1	Bibliografía			
	Lectura de documentos	50	15	750
2	Robot			
2.1	Material			
	Silicona EcoFlex Supersoft 00-30	5	32.7	163.5
2.2	Molde			
	ABS*	3	20	175.07
	PLA*	8	0.8	8.59
	Diseño	70	15	1050
2.3	Fabricación			
	Mano de obra	40	15	600
3	Componentes electrónicos y neumáticos			
3.1	Estación			
	PVC	1	3.95	3.95
	Tornillos	1	1.5	1.5
3.2	Sistema neumático			
	Electroválvula VDW20BZ1D	5	15.78	78.9
	Racor codo M5 a tubo 4mm	10	2.27	22.7
	Transporte	1	6	6
3.3	Sistema Electrónico			
	Arduino Pro Mini	1	1.2	1.2
	Programadores USB TTL	1	1.38	1.38
	Cableado	1	3.2	3.2
	Conectores JST	1	3.7	3.7
	Resistencia 1/4 W 22kΩ	10	0.02	0.2
	Sensor de flexión	10	11.5	115
	Módulo de relés	1	4.25	4.25
3.4	Fabricación			
	Mano de obra	40	15	600
4	Software			
4.1	Mano de obra	80	15	1200
5	Ensayos			
5.1	Mano de obra	70	15	1050
6	Memoria del TFG			
6.1	Redacción	80	15	1200
<b>TOTAL</b>				<b>7039.14</b>

**Cuadro 6.1: Presupuesto.**

### **6.3 Presupuesto**

---

\*En el caso de las impresoras se ha sumado el coste de amortización de la máquina. Se ha considerado amortización lineal.

La impresora de ABS costó 20000 €, y, con un tiempo de vida de 10 años (3650), habiendo hecho uso de ella 21 horas, la amortización sería de 115.07 €.

La impresora de PLA, sin embargo, costó 1690 €, y, con un tiempo de vida de 5 años (43200 horas), habiendo hecho uso de ella 56 horas, la amortización sería de 2.19 €.

# 7

## Experimentos y resultados

Este trabajo ha supuesto la creación de un robot flexible de cinco cámaras a partir de silicona, recorriendo desde su diseño y fabricación hasta su arquitectura y control.

Una vez expuestos todos estos aspectos del proyecto, es necesario detallar los experimentos llevados a cabo, que han permitido que la investigación siga su cauce para, finalmente, demostrar la eficacia del método de control realimentado y la influencia que la incorporación de los sensores produce en el robot.

Este capítulo recoge tales experimentos, diseñados a fin de obtener variables de rendimiento, avance o deformación, para tener la capacidad de comparar distintos ensayos y verificar la eficacia del método. Estas variables recogidas son, además, función de distintos parámetros, como la presión y el caudal.

En el caso del control temporal, además, influirá el tiempo de apertura de las válvulas impuesto, mientras que en caso de control realimentado, no se tiene el gobierno sobre dicho parámetro, siendo el programa el que internamente lo dictamine.

### 7.1. Ensayos

Los ensayos han supuesto una parte fundamental en este trabajo, a fin de poder atribuir los fallos del prototipo a alguna etapa concreta del proceso de diseño y fabricación,

y así poder modificarla.

Con este fin en mente se llevan a cabo los ensayos de forma sistemática, tratando de primero caracterizarlo en función de los siguientes parámetros:

- Presión que es capaz de soportar, dependiente de la diferencia de espesores de las superficies superior e inferior.
- Caudal, dependiente el espesor de la capa deformable.
- Tiempo de carga admisible, especialmente útil para el control en cadena abierta, puesto que es un parámetro a imponer por el usuario. En el caso del sistema realimentado, este se impone internamente en el programa. Dicho tiempo es función de la presión y el caudal seleccionado, por lo que depende de la diferencia de espesores entre capas y del espesor de la capa deformable.

Considerando estos parámetros, a continuación se procede a describir la metodología de ensayo.

### 7.1.1. Metodología de ensayo

A fin de prevenir posibles roturas o deformaciones plásticas, cuya reversibilidad es nula, se lleva a cabo una rutina de ensayo que denote una primera caracterización del modelo, contribuyendo al establecimiento de presión, caudal y tiempo de carga que determine su deformación.

Esta rutina de ensayo es la que sigue:

- Empleo del modo *selección de cámara*, a fin de llegar a un compromiso de presión-caudal-deformación.

Se comienza con bajas presiones, cuyo valor se va aumentando poco a poco. Sigue algo idéntico en el caso de la regulación del caudal.

Al finalizar esta etapa rutinaria se tiene un conocimiento suficiente del modelo en ámbitos de su deformación.

- Ejecución de la *calibración*, a fin de caracterizar al modelo con respecto a los cinco estados discretos del control.

En este método todavía se puede predecir algún error, permitiendo la modificación de alguna de las variables presión-caudal.

Una vez superados estos ensayos, encargados exclusivamente de la caracterización del prototipo, y únicamente entonces, se pasa a las siguientes etapas, que son:

- Desarrollo de la secuencia *test*, a fin de comprobar el funcionamiento del conjunto de las cámaras en su conjunto, y la puesta a punto de los modos calibrados.

A continuación se pasa, con los datos obtenidos de los ensayos de caracterización, a llevar a cabo las secuencias de modos de marcha.

En cualquier instante del ensayo puede resultar necesaria la comprobación del buen funcionamiento del prototipo, para lo que se emplearán los modos de *continuo* y *discreto*, en función de la verificación que se quiera llevar a cabo.

### 7.1.2. Ensayos del modo de marcha ondulante

En el Capítulo 5 se explicó el funcionamiento de este modo de marcha, programado mediante tablas y cuyo objetivo es producir la locomoción del prototipo a base de impulsos, de la parte trasera a la delantera del robot.

Estos ensayos se han desarrollado con los distintos métodos de control explicados en el Capítulo 5, cuyos procedimientos y resultados se pasan a exponer a continuación.

#### 7.1.2.1. Control en cadena abierta

A fin de obtener los resultados comparativos más objetivos, los ensayos en cadena abierta se realizan sin sensores y sistema embebido. De esta forma, no sólo aumenta la facilidad de fabricación, sino que, además, el modelado del mismo es más sencillo, siendo predecible la localización de la deformación.

Una vez realizados los procedimientos previos al ensayo, explicados anteriormente, se llevan a cabo distintos ensayos con el prototipo, considerando combinaciones de

## **7.1 Ensayos**

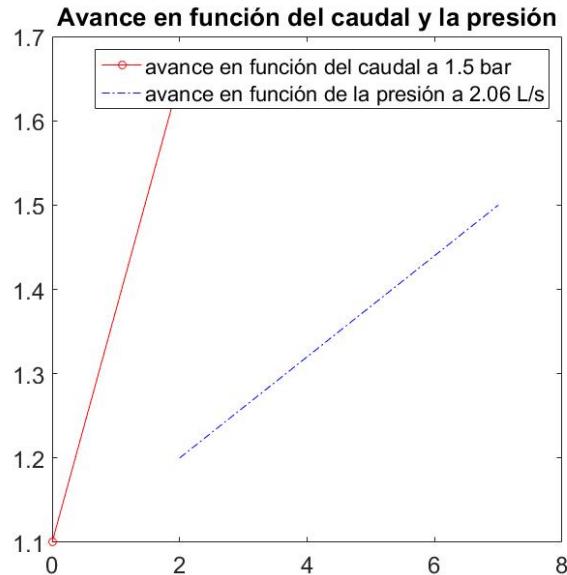
presión y caudal consideradas aceptables.

Con estos parámetros se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 7.1.

Ensayo	Presión (bar)	Caudal (L/s)	Tiempo (ms)	Ciclos	Avance (cm)
1	1.5	1.1	10	10	0
2	1.2	1.1	10	10	0
3	1.2	1.65	10	20	5
4	1.5	1.65	10	10	2
5	1.2	2.06	10	20	4
6	1.2	2.06	10	10	2
7	1.5	2.06	10	20	15

**Cuadro 7.1: Resultados de modo ondulante en cadena abierta.**

Estos resultados, a fin de ser mejor visualizados, se han desarrollado en una figura, cuya apariencia es la mostrada en la Figura 7.1.



**Figura 7.1: Resultados del ensayo del modo ondulante en cadena abierta** Se muestra el avance en función de la presión, el caudal, el tiempo de actualización de las cámaras y el número de ciclos.

### 7.1.2.2. Control en cadena cerrada

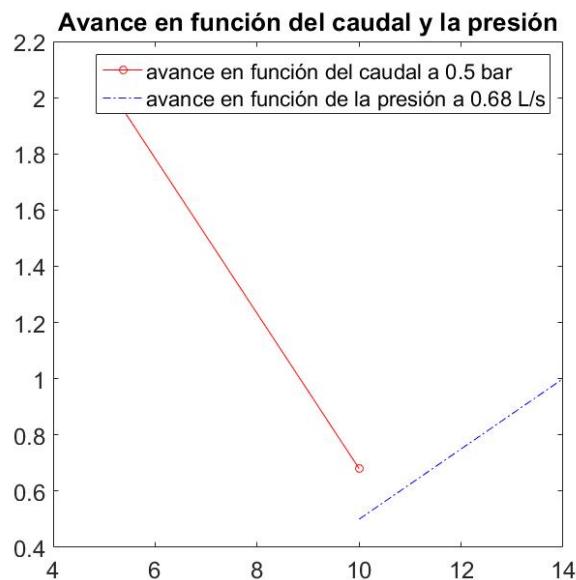
En el método de cadena cerrada, se incorporan los sensores y el sistema embebido, lo que dificulta la predicción del comportamiento del sistema. Es debido a esta circunstancia por la que ha sido complicado llegar a un resultado de compromiso entre los requisitos y objetivos deseados y los resultados obtenidos a partir de los métodos de diseño y fabricación llevados a cabo.

Con un conjunto de parámetros seleccionados a fin de optimizar los resultados, se llega a los resultados de la Tabla 7.2.

Ensayo	Presión (bar)	Caudal (L/s)	Ciclos	Avance (cm)
1	0.5	0.68	10	10
1	1	0.68	10	14
1	0.5	2.06	10	5

**Cuadro 7.2: Resultados de modo ondulante en cadena abierta.**

Su representación gráfica pasa a ser la mostrada en la Figura 7.2.



**Figura 7.2: Resultados del ensayo del modo ondulante en cadena cerrada.** Avance en función del caudal y la presión.

### **7.1.3. Ensayos del modo de marcha caminante**

En el Capítulo 5 se explicó que este modo de marcha pretende imitar la manera de caminar de los animales que andan sobre sus cuatro extremidades.

Al igual que el modo de marcha ondulante, se han llevado a cabo ensayos en cadena abierta y en cadena cerrada a fin de efectuar las comparaciones oportunas.

A pesar de no haber conseguido resultados notables en el desarrollo de la secuencia, queda patente una falta de coordinación en la cadena abierta, que se soluciona cerrando el bucle. El empleo de realimentación permite sincronizar las cámaras y conseguir el balanceo del robot. Sin embargo, no se consigue el avance del mismo.

## **7.2. Análisis de los resultados**

Los ensayos llevados a cabo, tras ser analizados, permiten extraer una serie de condiciones, diferentes en el caso de cadena abierta y cerrada.

- En el caso de los ensayos en cadena cerrada, se deja patente la relación entre el avance del cuerpo y la presión y el caudal.

Ambos parámetros suponen un aumento en el avance, y, además, se superponen sus efectos. Cuando uno de estos parámetros es demasiado reducido, no se produce la deformación de las cámaras, lo que impide el avance del robot.

Podría considerarse que esta situación es debida al tiempo de actualización, pero lo cierto es que, a falta de control en el llenado, es importante un impulso de aire que genere la deformación deseada en las cámaras. Cada cámara se carga a distinta velocidad por motivos fundamentalmente de su situación en el conjunto del robot. Debido a esto, a falta del control de la sincronización de las mismas, es preferible un impulso del suficiente aire a presión como para deformar la cámara.

El tiempo de apertura de las válvulas, o de actualización del instante de control, se escoge como el mínimo posible. Es por ello por lo que no aparecen datos de ensayos con un tiempo mayor a 10 ms.

## **7.2 Análisis de los resultados**

---

- En el caso de realimentación, queda demostrada la posibilidad de llevar a cabo estas secuencias con un caudal y presión mínimos, con el que en cadena abierta el robot no se desplazaba.

Esta situación se debe a la ausencia del tiempo de actualización. En el control temporal, se procedía a la siguiente etapa de la secuencia sin llegar al estado deseado de la etapa actual. Gracias a la realimentación, se garantiza el alcance de la deformación deseada de todas las cámaras, permitiendo un avance mayor para un mismo número de ciclos, si bien es necesario mayor tiempo, debido a posibles interferencias entre las cámaras. A pesar de ello, el resultado obtenido es satisfactorio.

El aumento de presión supone, al igual que en el control en cadena abierta, un aumento en el avance, debido a que, para un mismo caudal, la deformación es mayor y se alcanza previamente el estado deseado, siempre y cuando se mantenga un volumen de carga no demasiado elevado que dificulte el control.

Sin embargo, un aumento de caudal, decrementa el avance, al contrario que en el caso de control temporal. Esta situación se debe a que, debido a los retrasos del sistema, tanto en el microcontrolador como en el sistema de actuación, especialmente en los relés, el control de las cámaras se impregna de complejidad cuando se aumenta el volumen de aire introducido en un periodo de tiempo concreto, debido a que el sistema se vuelve oscilatorio y tarda en situarse dentro de los límites establecidos. Cuando lo hace, además, se sitúa al límite de éstos, convirtiéndose en la situación menos ventajosa de las deseables.

Hay que tener en consideración que en ambos métodos de control y para ambos parámetros (presión y caudal), existen límites, tanto superior como inferior que podrían llevar a la deformación permanente (e incluso rotura), en el caso del superior, o a la ausencia de deformación, en el caso del límite inferior.

Con estos razonamientos tenidos en cuenta, se llega a un resultado satisfactorio de los requisitos perseguidos a lo largo del desarrollo del trabajo.

# 8

## Conclusiones y trabajos futuros.

Este trabajo ha supuesto la creación de un soft-robot caminante, pasando por su diseño, su fabricación y su control. También se han realizado pequeños trabajos de diseño neumático y de programación de interfaces gráficas.

Gracias a esto, se han adquirido gran número de competencias, como el manejo de programas de diseño mecánico (Inventor), herramientas de software matemático (Matlab), concretamente para realizar GUIs de teleoperación, programación de microcontroladores (Arduini Mega) y herramientas sencillas de programación de controladores (Arduino Mini).

En el aspecto constructivo, se ha adquirido destreza en el manejo de elastómeros para la fabricación de soft-robots y nociones básicas de neumática.

Este capítulo recoge una síntesis de lo aprendido en la realización de este trabajo, destacando aquellos aspectos que se consideren más relevantes. Así mismo se propone una serie de direcciones futuras en las que continuar su desarrollo y por último se evalúa la responsabilidad ética, legal y profesional.

### **8.1. Conclusiones**

Este proyecto ha servido para comprobar que el trabajo de soft-robots, difiere completamente de los robots convencionales. Debido a sus características en cuanto a materiales y su pequeño desarrollo en comparación con aquellos de cadena cinemática rígida, la fabricación de un soft-robot adquiere especial importancia, y es crítica, especialmente si se trata de mantener un coste reducido, lo que afecta directamente a su funcionamiento y a la repetitividad entre modelos.

Por otro lado, se ha comprobado que al tratarse de un robot flexible, su control es significativamente más complicado que el de uno rígido por diversas razones.

La primera de éstas, su desarrollo tecnológico y teórico. Existen gran número de actuadores, sensores de odmetría y modelos cinemáticos y dinámicos ya desarrollados que hacen que no solo se tenga el conocimiento, sino también la intuición del funcionamiento a la hora de tomar decisiones de diseño.

La segunda razón, es su característica como sólido deformable, que hace que no se tenga un número finito de articulaciones localizadas que unen eslabones de dimensiones conocidas, sino que se tiene un volumen que, mediante un caudal, en el caso de este trabajo, intermitente, cambia de forma y volumen de una forma en mayor o menor medida impredecible debido a la complejidad de estudio de cuerpos flexibles y de las imperfecciones introducidas por la fabricación.

Pese a estos retos, se ha conseguido desarrollar un diseño y un proceso de fabricación que minimizan dicha introducción de imperfecciones, lo que concede la capacidad de predecir, en gran número de ocasiones y sin certeza absoluta del acierto, la deformación que va a adquirir la cámara, permitiendo así llevar a cabo tareas, en este caso modos de marcha, solicitadas por el usuario.

Esta circunstancia ha permitido facilitar la implementación del control en cadena cerrada en el sistema, lo que ha llevado, finalmente, a un control efectivo, capaz de rectificar la deformación del robot, permitiendo así un desarrollo de las trayectorias notablemente más eficaz.

### 8.2. Líneas futuras

Este proyecto se ha desarrollado con unos objetivos específicos que se han analizado y satisfecho. Pese a esta circunstancia, todo proyecto puede ser mejorado o ampliado. Esto sucede también en este trabajo, en los siguientes aspectos:

- **Mejoras en el diseño.** A pesar del profundo análisis con el que se ha desarrollado, todo diseño tiene mejoras.

En este caso, el desarrollo de un robot de menor peso conduciría a mejores resultados de los experimentos. Hay que contar, además con que el peso del cuerpo inicial fabricado en el molde no es el final del robot, sino una mínima parte, por lo que habrá contar con las partes adicionales.

- **Mejoras en la fabricación.** También se ha desarrollado detalladamente, a partir de los defectos que aparecían en los modelos.

Sin embargo, el carácter de escasa repetitividad que conlleva la fabricación se podría eliminar, o al menos minimizar, a partir de un método exacto de vertido de la silicona, que asegure la cantidad, así como la composición de la misma, también variable.

- **Mejoras en el control.** El empleo de control borroso en este sistema sería de gran utilidad para el desarrollo de las secuencias.

- **Utilización de otros materiales.** El empleo de una silicona menos flexible en la capa de los sensores, permitiría no utilizar el mallado, cuya incorporación al robot requiere de una notable cantidad de silicona, mientras que la silicona menos flexible se uniría de forma casi inmediata.

- **Autonomía.** Es un objetivo importante, puesto que permitiría su aplicación en ámbitos, por ejemplo de salvamento de zonas que han sufrido algún accidente natural o humano.

Existen válvulas y depósitos de aire de tamaño reducido, a fin de ir incorporadas en el robot. Sin embargo, el peso del robot habría de aumentar. y con ello los recursos económicos.

### **8.3 Impactos y responsabilidad legal, ética y laboral**

---

- **Algoritmos genéticos.** Supondría el aprendizaje del robot de los modos de marcha, consiguiendo obtener una solución de la realización de los mismos más óptima de la alcanzada.

#### **8.3. Impactos y responsabilidad legal, ética y laboral**

La elaboración de todo proyecto requiere de una evaluación global del mismo, no atendiendo a aspectos meramente técnicos, sino proyectando la visión a un plano social y medioambiental.

En el Capítulo 1 se mencionaron las ventajas con que contaban los *soft robot* y en el Capítulo 2, las aplicaciones en que su empleo se está incrementando.

Recuperando estos argumentos, una de las ventajas fundamentales de la robótica flexible es la seguridad para el usuario, puesto que, la naturaleza intrínseca de los materiales con que se conforman estos sistemas confiere a los robots unas características muy peculiares.

Entre estas características se puede citar, por ejemplo, la deformación elástica, lo que les permite la absorción de golpes. Se reduce, pues, la necesidad de incorporación de mecanismos que absorban los golpes, tal y como sucede cada vez más con la robótica rígida.

Otra de las características que le confiere su condición de flexible es la reducida incisión sobre los elementos de su alrededor con que cuenta, lo que es de notable utilidad en determinadas aplicaciones, como es, por ejemplo, el campo de la medicina.

En este campo, tan importante para salvar vidas humanas, la capacidad de reducida incisión de la robótica flexible ha conducido a su implementación en operaciones quirúrgicas, especialmente las llevadas a cabo en la zona del abdomen. Con los instrumentos adecuados, se reducen las intervenciones arriesgadas optando por el empleo de estos materiales.

Existen pequeños *soft robots* con cámaras incorporadas que permiten una visión en paralelo del interior del cuerpo, siendo necesario para obtenerla una mínima incisión

### **8.3 Impactos y responsabilidad legal, ética y laboral**

---

en el mismo. Esta situación implica un control más global de la intervención por parte del cirujano, sin producir daños en el organismo del paciente.

Otra aplicación en este campo es el suministro de medicamentos. Los materiales con los que se construyen estos robots reaccionan ante estímulos externos. La construcción de nanorobots capaces de contraerse ante un estímulo luminoso, como un láser, permite el suministro de un medicamento a una zona concreta del cuerpo, mediante el previo transporte del mismo a dicha zona, con una mínima incisión por ser de material blando. El comportamiento es similar al de una esponja: previamente se empapa con la sustancia deseada y, al llegar a la localización de interés se exprime hasta expulsar la sustancia. Esta técnica permite salvar vidas puesto que, ante determinadas enfermedades, no se suministran ciertos medicamentos, necesarios para la zona dañada pero perjudiciales para otras partes del organismo, optando por no dañar a nuevos órganos del cuerpo.

En este campo también se empiezan a implementar estos sistemas en el transplante y la rehabilitación, debido a que, por su condición flexible, son más adecuados para la implementación en el cuerpo humano. Incluso pueden llegar a permitir la locomoción de personas incapaces por motivos de enfermedades discapacitatorias.

Del origen de estos sistemas, concretamente del hecho de que estén bio-inspirados por animales sin esqueleto, surge la ventaja de la adaptación al medio, a lugares donde los robots rígidos no podrían acceder, o si lo hicieran sería más costoso técnica y económicamente. Esta circunstancia hace de estos dispositivos unos elementos notablemente adecuados para operaciones de salvamento y rescate.

Más allá de estos ámbitos, el empleo de este robot también tiene aplicaciones en el ámbito laboral del obrero. En los últimos años, el auge tecnológico ha llevado a la sustitución de trabajadores por maquinaria y robots. Sin embargo, los robots rígidos no resultan ventajosos, por motivos económicos normalmente, en el desarrollo de determinadas actividades.

La robótica flexible, con sus características, conlleva una serie de ventajas. Entre ellos, aportaría beneficios en el ámbito obrero. Es decir, permitiría que estos mejoraran su trabajo a partir de su empleo. Esta situación, además, entusiasma a los más críticos con los robots y su ética, los preocupados por un futuro en el que los beneficios de todos

### **8.3 Impactos y responsabilidad legal, ética y laboral**

los trabajos se dirijan hacia el dueño del robot o el escritor de los algoritmos de control. La robótica flexible supondría, por tanto, una solución intermedia, con beneficios tanto para el empresario como para el trabajador.

# Bibliografía

- [1] VICTOR BARROSO MORENO. **Desarrollo y control de un soft-robot caminante con accionamiento neumático.** *TFG ETSII UPM*, Julio 2015. v, 3, 18, 20, 45, 49
- [2] T. SHIBATA, Y. KAWAGUCHI, AND K. WADA. **Investigation on people living with Paro at home.** In *RO-MAN 2009 - The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pages 1131–1136, Sept 2009. 1
- [3] PABLO VICENTE, WEICHEN LI Y JULIÁN CARO. **Soft Robotics: Una aproximación al campo de los robots blandos.** *Documento interno Master Centro de automática y Robótica UPM-CSIC*. 8
- [4] S. SEOK, C. D. ONAL, K. J. CHO, R. J. WOOD, D. RUS, AND S. KIM. **Meshworm: A Peristaltic Soft Robot With Antagonistic Nickel Titanium Coil Actuators.** *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **18**(5):1485–1497, Oct 2013. 9
- [5] J. S. KIM, G. P. JUNG, J. S. KOH, AND K. J. CHO. **Meso-scale robot assembly using shape memory polymer rivet fastener.** In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2082–2082, Nov 2013. 9
- [6] M. M. BILLAH, R. KHAN, A. A. SHAFIE, AND R. AKMELIAWATI. **Electroactive polymer actuated tendon driven micro actuator for robotic application.** In *2014 IEEE International Nanoelectronics Conference (INEC)*, pages 1–4, July 2014. 10
- [7] ROBERT F. SHEPHERD, FILIP ILIEVSKI, WONJAE CHOI, STEPHEN A. MORIN, ADAM A. STOKES, AARON D. MAZZEO, XIN CHEN, MICHAEL WANG, AND GEORGE M. WHITESIDES. **Multigait soft robot.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**(51):20400–20403, 2011. 11, 13, 15, 34
- [8] C. DURIEZ. **Control of elastic soft robots based on real-time finite element method.** In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 3982–3987, May 2013. 11, 12, 13
- [9] DANIELA RUS AND MICHAEL T. TOLLEY. **Design, Fabrication and Control of Soft Robots.** *521*(7553):467–475, May 2015. 12, 13
- [10] JOHN A. ROGERS, TAKAO SOMEYA, AND YONGGANG HUANG. **Materials and Mechanics for Stretchable Electronics.** *Science*, **327**(5973):1603–1607, 2010. 13, 14
- [11] A. D. MARCHESE, K. KOMOROWSKI, C. D. ONAL, AND D. RUS. **Design and control of a soft and continuously deformable 2D robotic manipulation system.** In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2189–2196, May 2014. 14
- [12] N. NAPP, B. ARAKI, M. T. TOLLEY, R. NAGPAL, AND R. J. WOOD. **Simple passive valves for addressable pneumatic actuation.** In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1440–1445, May 2014. 15
- [13] EUGENE GOLDFIELD, YONG-LAE PARK, BOR-RONG CHEN, WEN-HAO HSU, DIANA YOUNG, MICHAEL WEHNER, DAMIAN G. KELTY-STEPHEN, LEIA STIRLING, MARC WEINBERG, D. NEWMAN, RADHIKA NAGPAL, ELLIOT SALTMAN, KENNETH G. HOLT, CONOR J WALSH, AND ROBERT J. WOOD. **Bio-Inspired Design of Soft Robotic Assistive Devices: The Interface of Physics, Biology, and Behavior.** *Ecological Psychology*, **24**(4):300–327, 2012. 15
- [14] K. SUZUMORI, S. IKURA, AND H. TANAKA. **Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms.** In *Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on*, pages 1622–1627 vol.2, Apr 1991. 16
- [15] ROBERT F. SHEPHERD, FILIP ILIEVSKI, WONJAE CHOI, STEPHEN A. MORIN, ADAM A. STOKES, AARON D. MAZZEO, XIN CHEN, MICHAEL WANG, AND GEORGE M. WHITESIDES. **Multigait soft robot.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**(51):20400–20403, 2011. 34