

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES**

DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ROBÓTICA
INDUSTRIAL

**DESARROLLO Y CONTROL DE UN SOFT-ROBOT
CAMINANTE CON ACCIONAMIENTO NEUMÁTICO**

Trabajo Fin de Grado

AUTOR

Víctor Barroso Moreno

DIRECTOR

Antonio Barrientos Cruz

Julio 2015

AGRADECIMIENTOS

Hace cuatro años salí de mi casa para crecer, formarme, y en definitiva, aprender. Aprender, estudiar, y enriquecerme, tengo claro que lo he conseguido, y echando la vista atrás, puedo decir con orgullo que hoy soy mejor de lo que era el día en que mis padres me despedían a la puerta de la universidad. Precisamente ellos me enseñaron que hay valores que deben prevalecer por encima de cualquier logro personal o profesional, y entre ellos, está el don de ser agradecido.

Me gustaría agradecerles todo lo que han hecho por mí, y el apoyo incondicional que he encontrado en ellos a lo largo de estos años, y en especial durante estos últimos días. Me gustaría extender el agradecimiento al resto de mi familia y amigos, por idénticos motivos, y a los compañeros de facultad, por ser el apoyo que en tantas ocasiones hace falta para seguir adelante.

Por último, me gustaría agradecer a mi profesor y tutor D. Antonio Barrientos, por haber compartido la idea y el proyecto conmigo, por sus indicaciones, su cercanía y experiencia, que tan bien ha sabido compartir, y de la que tanto he podido aprender.

A todos, muchas gracias.

RESUMEN

Durante la última década la comunidad científica ha asistido al nacimiento de una nueva tecnología de construcción robótica, que pretende revolucionar el concepto de robot tal y como se entiende a día de hoy: se viven los albores de la era de la robótica flexible, denominada en inglés como ‘*soft robotics*’.

El objetivo del trabajo consiste en el diseño y construcción de un *soft robot* caminante construido a base de silicona, así como del sistema necesario para el control y regulación del mismo, consiguiendo actuar sobre él de forma que pueda avanzar de forma efectiva en dirección longitudinal.

Los *soft robots*, nombre con el que se ha designado desde el inicio de su desarrollo a estos nuevos dispositivos, se caracterizan por emplear materiales de construcción blandos, ligeros y flexibles, a través de métodos de construcción y actuación que se alejan de la robótica tradicional.

De este modo, a través del empleo de siliconas, mallados de cables de aleaciones SMA y otro de tipo de materiales elásticos y flexibles se consiguen robots funcionales carentes de elementos rígidos.

Esta ausencia de componentes tradicionales en el mundo de la robótica aporta ciertas ventajas a los *soft robots*. Entre ellas, está la posibilidad de interacción con el usuario mientras se encuentran en funcionamiento gracias a su capacidad de absorber energía en un posible impacto. Se diferencian así de las máquinas industriales, que necesitan de espacios y perímetros de seguridad para operar. Otra de las grandes ventajas que presentan es la posibilidad de deformarse adoptando posiciones de gran complejidad, consiguiendo formas intrincadas, difíciles de conseguir a partir de cuerpos rígidos.

Una de las características que definen el estudio y desarrollo de la robótica flexible se da a la hora de intentar clasificar los diferentes tipos de robot existentes. Hasta la fecha, la bibliografía ha intentado definir las diferentes tipologías en base a dos aspectos: el modo de fabricación, y el modo de actuación. Sin embargo, ambos aspectos se encuentran íntimamente relacionados entre sí, y se definen de forma mutua: para cada tipo de actuador existe un cierto tipo de material, y viceversa.

De este modo, se distinguen hasta 4 familias de robots flexibles:

- Robot tipo FEA (Fluidic Elastomeric Actuator), fabricado a base de silicona flexible y técnica de moldeo, y actuado a base de aire en el rango de bajas presiones.
- Robot tipo músculo neumático (o de tipo McKibben), fabricado a base de tejido de malla flexible, y actuado a base de aire en el rango de altas presiones.
- Robot de accionamiento por cables, contruidos a base de tendones embebidos en una estructura blanda de elastómero, y accionados por servomotores.
- Robot tipo SMA (Shape Memory Alloy), fabricado a base de cables de nitinol que se unen creando un mallado adecuado.

La clasificación expuesta también resume el grado de flexibilidad de los diferentes tipos de robot, siendo los FEA los más flexibles de todos, y los de tipo SMA los más rígidos.

El proyecto desarrollado en este trabajo comprende el **desarrollo**, la **construcción** y el **control** de un robot cuadrúpedo caminante de tipo FEA, con cinco cámaras neumáticas de control independiente.

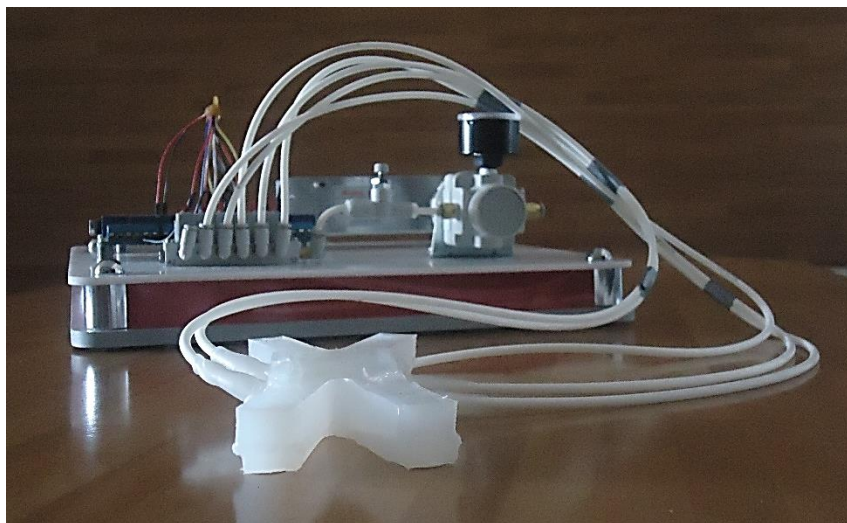


Figura 0-1: Robot completo, incluyendo la estación para su funcionamiento.

Para ello, es necesario emplear diferentes técnicas y herramientas para efectuar y verificar el diseño empleado. Entre ellas, las de uso más habitual comprenden el análisis por elementos finitos, las herramientas de CAD, simuladores gráficos de entornos físicos, o aplicaciones de simulación dinámica de fluidos.

En el caso concreto del cuadrúpedo desarrollado, se han empleado diferentes aplicaciones de Siemens, en particular los softwares NX y Solid Edge para el análisis por elementos finitos y el diseño de los moldes para la producción del robot, respectivamente. Además se ha utilizado el simulador VoxCAD para analizar la interacción entre el material de silicona y el entorno de su movimiento, permitiendo recrear las condiciones de fricción.

Precisamente el estudio de la interacción entre robot y superficie de contacto es uno de los aspectos de relevancia en el tipo de actuador empleado en el proyecto, ya que el avance efectivo del robot se basa en aprovechar y maximizar las condiciones de contacto, que en combinación con la deformación del robot, permite el funcionamiento del mismo.

Es necesario comentar la necesidad de caracterizar de forma adecuada la silicona empleada en el proyecto, ya que las librerías comerciales carecen de este tipo de materiales. Es por ello por lo que se han llevado a cabo ensayos de caracterización para obtener sus propiedades físicas, tales como el módulo elástico, o el módulo de Poisson.

Para la construcción del robot se ha empleado una técnica de moldeo de la silicona de construcción sobre moldes diseñados en la herramienta de CAD, e impresos en 3D con plástico de tipo ABS. El moldeo consiste en la mezcla previa de dos productos proporcionados por el fabricante de la silicona, y su vertido en los moldes, tras el que ha de esperarse el tiempo de curado previsto para la solidificación de la mezcla. Dicho tiempo de curado varía de forma relevante en función de la temperatura ambiente, produciéndose variaciones drásticas del mismo cuando se emplea un horno de curado. Tras la obtención de las partes del robot, se ha llevado a cabo el montaje del mismo empleando la propia silicona de fabricación para pegarlas entre sí.

Se han necesitado varios montajes, corrigiendo errores de fabricación entre montaje y montaje, hasta elaborar un método eficaz que asegura un funcionamiento correcto.

Para el accionamiento del robot de tipo FEA ha de emplearse aire a presión, en un rango que oscila entre los 1 y los 3 bares, el cuál ha de regularse y adecuarse para poder ser empleado en el accionamiento. Es por ello, por lo que se ha decidido diseñar y construir una estación global de control, en la que se aúna el tratamiento de la potencia neumática y la potencia electrónica necesaria para poner en marcha la actuación.

Para la construcción de dicha base se emplean materiales comunes tales como madera y metacrilato, habiéndose llevado a cabo el proceso de manufactura con herramientas de bricolaje y el utillaje necesario. La base posee un doble fondo, en el que se oculta el cableado para un mejor aspecto de la instalación.



Figura 0-2: Robot durante su fase de construcción.

El grupo de componentes a montar sobre la placa con esa función electrónica y neumática mencionada se selecciona en catálogos comerciales y tras mantener una serie de reuniones con diferentes representantes de empresas especializadas. El objetivo de las reuniones consiste en definir y concretar el sistema más pequeño posible que permita llevar a cabo la actuación deseada.

Finalmente, el circuito neumático elegido incluye:

- Los mecanismos de regulación de caudal y presión necesarios para adecuar la toma de presión disponible para los ensayos (compresor con depósito de funcionamiento nominal a 6 bares) a las condiciones operativas del robot (rango de presiones entre 1 y 3 bares y caudal limitado).
- El conjunto de electroválvulas de accionamiento de las cámaras del robot.

En cuanto a los componentes electrónicos, es necesario hacer mención al método de control que se lleva a cabo para poder definirlos.

El control y la regulación de cualquier robot industrial mejora cuando se implementa una lógica de circuito cerrado, en la que se realmente el estado del sistema como referencia con la que corregir o dirigir la acción de control. Para lograrlo, es necesario distribuir a lo largo de la instalación diferentes dispositivos de medida que permitan realizar esa evaluación instantánea de las condiciones del sistema.

La estabilidad y la toma correcta de las medidas dependen por una parte de la efectividad de los sensores, y por otra de la correcta situación e instalación de los mismos. En robots de naturaleza rígida, es fácil llevar a cabo dicha instalación, así como la calibración de los sensores, asegurando un comportamiento adecuado a lo largo del tiempo.

Sin embargo, hay una carencia de estos sistemas en el ámbito de la robótica flexible, ante la imposibilidad de montarlos sobre la propia estructura del robot (no es capaz de soportar mucho peso ni grandes cargas). Esto limita el tipo de diseños de bucle cerrado que pueden plantearse para este tipo de robots, tratándose siempre de sistemas externos al robot, y basados por lo general en tratamiento de imagen.

Debido a la complejidad de esas técnicas, se ha decidido optar por un sistema de control en bucle abierto, con todo lo que ello implica: necesidad de pruebas y ensayos previos para la calibración del sistema, así como la inseguridad propia de no poder prever posibles alteraciones o fallos en servicio.

Con ello en mente, la instalación electrónica que ejecuta el control sobre el montaje realizado consta de los siguientes elementos:

- Toma de potencia a través de una fuente de tensión que convierte los parámetros de la red a corriente continua. La potencia de la fuente se emplea para alimentar las electroválvulas del circuito neumático.
- Arduino Mega 2560 R3, conectado a una interfase gráfica construida en Matlab, que ejecuta las órdenes de salida que recibe del código ejecutado en el PC.
- Módulo de relés, responsable de convertir las señales de mando del controlador Arduino en el accionamiento efectivo de las electroválvulas, canalizando la potencia de la fuente de alimentación.

Como se ha comentado, las órdenes de control vienen impuestas por una interfaz gráfica diseñada en Matlab, y que ejecuta código compatible con el procesador empleado, consiguiendo así un método gráfico y sencillo de usar para poner en marcha el robot. En dicha interfaz pueden seleccionarse las opciones elementales para el funcionamiento del robot, tales como la secuencia de marcha que debe seguir, o el número de repeticiones de cada ciclo de marcha.

Tras el diseño del sistema de actuación y control, y su construcción, se han llevado a cabo las pruebas correspondientes para lograr su implementación y correcto funcionamiento. Se han testado por separado el sistema electrónico, neumático, y el código de PC, habiendo verificado el correcto funcionamiento de todas las partes.

Una vez puesta en marcha la instalación, se inicia el periodo de pruebas de la misma, en el que se diseñan y mejoran los códigos correspondientes a las diferentes secuencias de marcha del robot. Tras varias iteraciones, se han obtenido mecanismos efectivos de avance del robot, pudiendo dar paso así a la fase de ensayos del mismo.

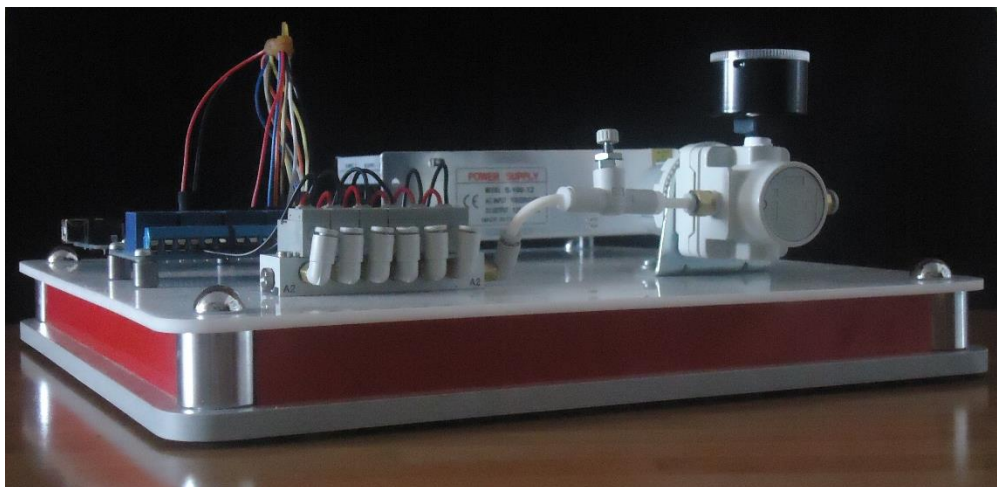


Figura 0-3: Estación de funcionamiento.

Los ensayos llevados a cabo pretenden demostrar la variación en el comportamiento del robot en función de los parámetros de control, como pueden ser la presión de alimentación del circuito neumático, o el volumen de carga (total de aire introducido en el robot). Se han efectuado tandas de ensayos con las secuencias diseñadas, comprobando ciertos patrones comunes de variación del avance total del robot en función de los parámetros de entrada al sistema para las diferentes secuencias.

También se ha realizado un interesante análisis sobre el comportamiento que muestra el robot en función de la interacción de fricción que experimenta con la superficie de contacto.

Tras los ensayos, el estudio realizado de los mismos demuestra que la locomoción del robot con las secuencias de marcha diseñadas es efectiva: se ha conseguido desplazarlo en dirección de avance en mayor o menor medida, en función de la secuencia empleada y las características de la actuación (presión, volumen de carga, condiciones de rozamiento, etc.).

De este modo se consiguen cumplir los objetivos del trabajo:

- Se ha conseguido diseñar un *soft robot* al completo, incluyendo el actuador flexible a base de silicona y la estación para su accionamiento, así como la programación necesaria (secuencias de marcha, etc.) para lograr su locomoción.
- Se ha conseguido construir el diseño planificado, empleando para ello un ciclo iterativo de mejoras que permite obtener un prototipo funcional, que responde a las expectativas de diseño previstas.
- Se ha conseguido poner en marcha la instalación, y hacer funcionar el robot, verificando y optimizando el funcionamiento todos sus componentes (tanto en hardware como en software), consiguiendo finalmente que avance de forma efectiva.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| AGRADECIMIENTOS | i |
| RESUMEN..... | iii |
| ÍNDICE DE CONTENIDO..... | ix |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS DEL TFG | 5 |
| 1.2 ESTRUCTURA..... | 5 |
| 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE..... | 7 |
| 2.1 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, DISEÑO Y FABRICACIÓN | 9 |
| 2.2 CONTROL..... | 18 |
| 2.3 APLICACIONES | 21 |
| 3. HERRAMIENTAS Y MATERIALES | 25 |
| 3.1 SOFTWARE | 25 |
| 3.2 MATERIALES..... | 26 |
| 3.3 HARDWARE..... | 28 |
| 4. DISEÑO Y DESARROLLO | 35 |
| 4.1 BRAZO ÚNICO..... | 35 |
| 4.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL..... | 36 |
| 4.1.2 DISEÑO GEOMÉTRICO | 40 |
| 4.1.3 INCIDENCIAS Y LIMITACIONES EN LA SIMULACIÓN | 50 |
| 4.2 ANÁLISIS E INTERACCIÓN CON EL ENTORNO..... | 51 |
| 4.2.1 AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN | 52 |
| 4.2.2 CAMINANTE CUADRÚPEDO..... | 58 |
| 4.3 DISEÑO DEL ROBOT | 60 |
| 4.4 CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT | 62 |
| 5. CONTROL..... | 65 |
| 5.1 VARIABLES BÁSICAS DE CONTROL | 66 |
| 5.2 INTERFAZ DE CONTROL | 68 |
| 5.3 SECUENCIA DE MARCHA..... | 69 |
| 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 77 |
| 6.1 ENSAYOS | 77 |
| 6.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN | 82 |
| 6.3 IMPACTOS Y RESPONSABILIDAD LEGAL, ÉTICA Y LABORAL | 84 |
| 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS | 87 |

| | |
|---|-----|
| 8. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO | 91 |
| 8.1 ESTRUCTURA DE DESCOMPOSICIÓN DEL PROYECTO (EDP) | 91 |
| 8.2 DIAGRAMA DE GANTT | 93 |
| 8.3 PRESUPUESTO | 94 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS | 95 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 97 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 101 |

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La aparición de los primeros robots industriales, durante los años 60 del siglo XX supuso una revolución en el mundo de la automatización, permitiendo aunar en dispositivos únicos hasta la fecha lo mejor de dos tecnologías. Una de ellas, el diseño mecánico, había sido perfeccionada desde la época de la civilización griega. La otra, la electrónica moderna, apenas llevaba una década en desarrollo.

La suma de ambas supuso un *boom* tecnológico sin precedentes: las tareas difíciles, repetitivas y peligrosas eran realizadas por máquinas rápidas, de gran precisión y resistentes a atmósferas y productos peligrosos. El impacto que tuvo en la concepción de la industria repercutió en las economías de los países más desarrollados. De esta forma, durante 60 años los robots industriales y de aplicación doméstica han sido perfeccionados y optimizados, permitiendo su trabajo en condiciones de gran sollicitación técnica.

Sin embargo, hace aproximadamente 5 años comenzó a fraguarse una nueva revolución técnica y filosófica en el ámbito de la robótica moderna. Nace la era del *soft robot*.

El término *soft robot* hace alusión a una nueva familia de robots de inspiración biológica, que emplean materiales novedosos, tales como siliconas, aleaciones con memoria de forma, o tejidos sensibles a la estimulación eléctrica, para la construcción de pequeños organismos con funcionalidad de relativa complejidad. Se caracterizan, fundamentalmente, por sus propiedades, que los alejan de la concepción tradicional de robot: son, en esencia, máquinas blandas, flexibles y altamente deformables.

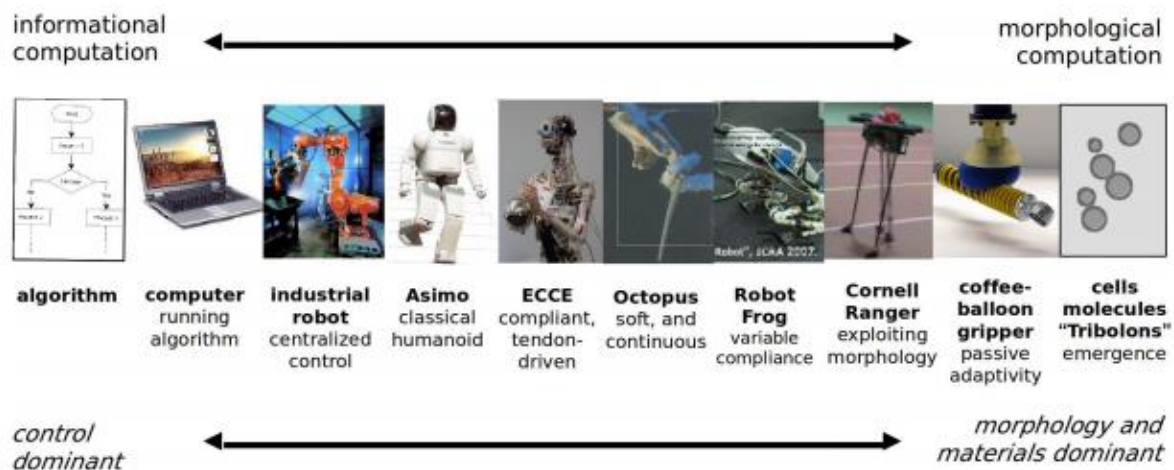


Figura 1-4: La figura muestra el grado de relación del sistema y su entorno. A la izquierda, los algoritmos y ordenadores tienen una mínima dependencia de su entorno físico, mientras que hacia la derecha, los sistemas más blandos necesitan de dicha interacción [8].

Las máquinas industriales tienden a diseñarse con objetivos de resistencia y seguridad que conducen a soluciones de estructuras rígidas, que puedan moverse de forma rápida, precisa, fuerte y repetitiva. De igual forma, los actuadores que mueven dichas máquinas suelen basarse en sistemas electromagnéticos o motores de combustión interna, de nuevo contruidos a partir de piezas metálicas (aleaciones de acero, aluminio, etc.), y que soportan los mismos criterios de sollicitación.

1. INTRODUCCIÓN

En contraste, los *soft robots* surgen de la observación directa de la naturaleza, y de un intento por imitar los mecanismos primarios de funcionamiento y locomoción animal. Resulta lógico abordar el estudio desde esta perspectiva, en la medida en que la naturaleza y sus estructuras son el resultado de un proceso evolutivo de millones de años, y por tanto están optimizadas para su funcionamiento en unas determinadas condiciones.

Ciertas familias de organismos deben de mencionarse como fuentes de inspiración para la concepción de estos novedosos robots, al componerse fundamentalmente de estructuras blandas. Destacan entre dichas familias, los organismos vermiformes (anélidos, nematodos, etc.), y algunos tipos de moluscos, como los cefalópodos y los gasterópodos.

En el caso de los organismos vermiformes (comúnmente conocidos como ‘gusanos’), su estructura se compone en muchos casos de fibras en forma anular, que se entrelazan con fibras longitudinales que aportan rigidez al conjunto, y permiten su deformación peristáltica, impulsada por el flujo de sangre por sus conductos vasculares. Su secuencia de locomoción es muy característica y se ha imitado repetidas veces en los primeros prototipos de *soft robots*.

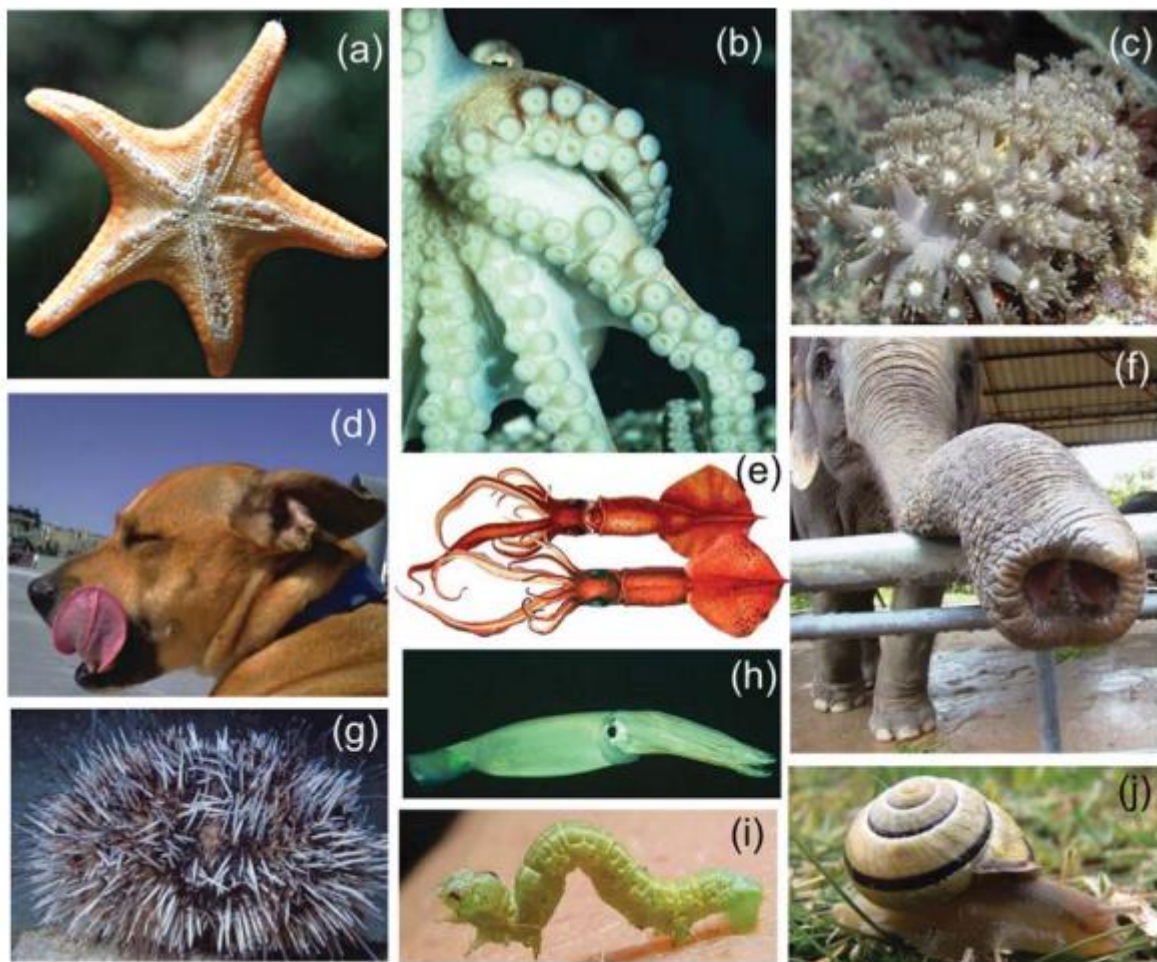


Figura 1-5: Ejemplos de inspiración biológica: (a) estrella de mar, (b) pulpo, (c) anémona colonial, (d) lengua de mamífero, (e) calamar, (f) trompa de elefante, (g) equinoidea, (h) *Illex illecebrosus*, (i) gusano, (j) caracol [5].

Por otra parte, los moluscos han evolucionado hacia formas estructurales basadas en esqueletos cartilaginosos, subcutáneos, y que permiten un alto grado de deformación del cuerpo

1. INTRODUCCIÓN

accionado por el tejido blando. Algunos casos, como los miembros de la familia octópoda (los pulpos), carecen de cualquier tipo de esqueleto. Los impulsos que el sistema nervioso genera sobre sus músculos conducen a movimientos suaves y de trayectoria compleja que optimizan su desplazamiento en el agua.

El interés por los *soft robots* es creciente a medida que se desarrollan sistemas de funcionalidad más compleja. Al ser un campo de estudio de reciente creación, su curva de desarrollo presenta una marcada pendiente, y eso permite que cada poco tiempo aparezcan nuevos y mejores diseños. La filosofía detrás de este tipo de robots tiene ciertos atractivos que despiertan el interés de la comunidad científica y motivan el desarrollo de los mismos.

Los ejemplos citados anteriormente ilustran que los músculos y tejidos blandos son esenciales para el entendimiento de la mecánica y la locomoción orgánica. Éstos han evolucionado junto con el sistema nervioso central de los organismos formando sistemas integrados de regulación neuro-mecánica, para moverse de forma efectiva en un entorno natural altamente complejo, y hasta cierto punto impredecible, aleatorio.

Es precisamente esa característica de adaptabilidad al entorno de trabajo una de las más relevantes en el diseño de *soft robots*. Es frecuente encontrar problemas de diseño de controladores para robots rígidos que limitan mucho su capacidad de interpretación del medio. Esto se debe, en gran parte, a su geometría, únicamente variable a través de ciertos grados de articulación. Esto hace que el robot pueda verse en problemas al intentar afrontar obstáculos de carácter natural como pueda ser un desnivel pronunciado o un agujero en el terreno. De hecho, en muchas ocasiones obstáculos de este tipo provocan la inestabilidad de la estructura, y su consiguiente pérdida de equilibrio.

Por su parte los robots contruidos a base de material ‘blando’ poseen una inherente capacidad de deformación, que les permite adaptarse a la superficie sobre la que circulan, y conseguir así sobreponerse a las dificultades mencionadas anteriormente. Además, los materiales de construcción son tales (especialmente en el caso de las siliconas), que generan fuerzas de fricción que ayudan a superar las oscilaciones del terreno. Como se verá en argumentos posteriores, la mencionada fricción juega un papel fundamental en el desarrollo de secuencias de locomoción efectivas.

La capacidad de adaptabilidad al terreno que se ha comentado presenta además otra ventaja. Al poder recubrir la superficie de contacto y amoldarse a la misma de forma mecánica, se reduce la necesidad de sensores y sistemas de control sofisticados. Esto simplifica el diseño, y reduce los costes significativamente.

Otra de las motivaciones que llevan al estudio de *soft robots* es la seguridad de operación de este tipo de máquinas. Uno de los retos de la robótica actual su aplicación al día a día, y para lograrlo se requieren máquinas capaces de manipular objetos, moverse en entornos comunes con el ser humano, e interactuar con el usuario. Todo ello, teniendo presentes los requisitos de robustez de operación y seguridad necesarios.

Las primeras soluciones, rígidas, que intentan contemplar esas condiciones de funcionamiento fueron brazos de fisonomía antropomórfica y gran precisión y coordinación entre sus grados de libertad. Sin embargo, los *soft robots* ofrecen grandes posibilidades de desarrollo de soluciones similares, incorporando ventajas únicas correspondientes a su naturaleza.

1. INTRODUCCIÓN

Los robots tradicionales, contruidos con materiales rígidos, son peligrosos. Sus velocidades de operación, y la fuerza que desarrollan hacen que tengan que trabajar en espacios cerrados y son necesarios mecanismos de seguridad que corten la alimentación de potencia en caso de emergencia.

En contrapartida, los *soft robots*, contruidos en materiales blandos, y cuyas velocidades operativas son menores, se han definido en muchas ocasiones en la bibliografía inglesa como *user-friendly*, traducido al castellano, ‘amigables para el usuario’.

Más allá de lo anecdótico del término, lo que sí que es cierto es que la interacción con este tipo de diseños es fácil, y no conlleva peligro alguno tocar o corregir la actuación del robot mientras está operando.

Igualmente en relación con la seguridad, los *soft robots* son más resistentes a impactos y accidentes, dada su naturaleza flexible y resiliente. Además, su sencillez de construcción, y ausencia de elementos accesorios montados sobre ellos, tales como sensores o cableado evitan, o al menos reducen el riesgo de fallo o accidente del montaje, al tiempo que permiten su traslado desde entornos industriales, preparados para su funcionamiento, a situaciones domésticas en las que no se dispone de estaciones de potencia ni el entorno necesario para operar un robot industrial.

Lo explicado hace que uno de los campos con mayor interés en el desarrollo de *soft robots* funcionales sea el ámbito médico. En la actualidad hay varios proyectos de investigación que persiguen desarrollar robots de asistencia durante cirugías complejas, así como exoesqueletos de rehabilitación fisioterapéutica.

Sin embargo, la motivación última del campo médico en relación a los *soft robots* es el desarrollo de órganos funcionales, contruidos a base de material biológico y células vivas, movidos por compuestos bioquímicos segregados por el propio organismo, tales como lípidos y azúcares.

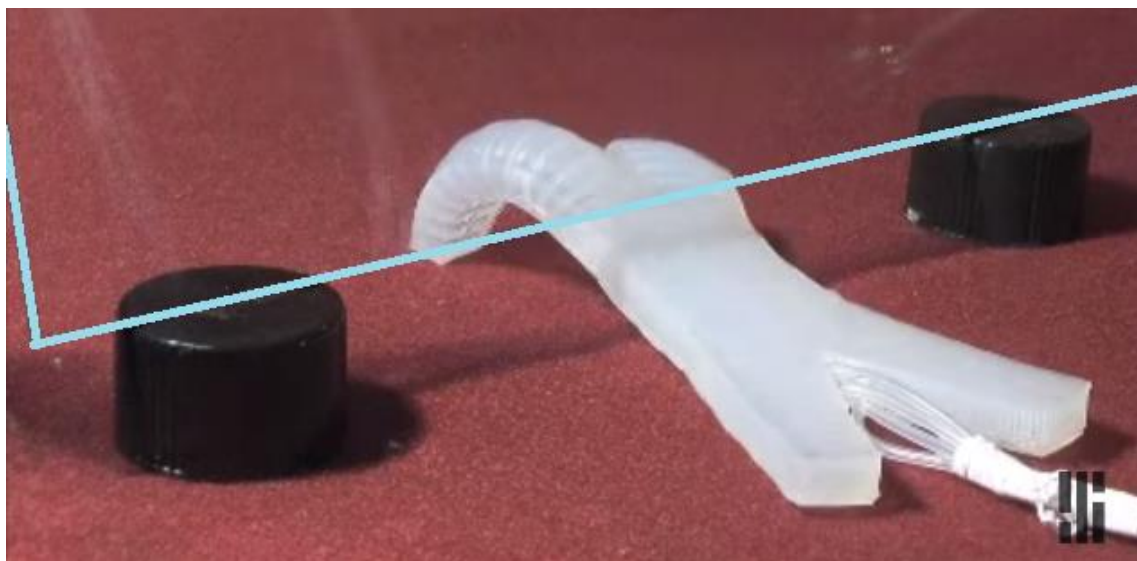


Figura 1-6: Robot caminante de tipo FEA pasando através de una pequeña abertura [11].

1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto a comentar, y de gran importancia para entender la ruptura conceptual que supone el diseño y fabricación de *soft robots*, es la facilidad de diseñar y construir un robot desde cero en pocos días y a un coste ridículamente barato si se compara con un robot rígido de funcionalidad similar. La comparativa temporal y económica se reduce únicamente a la fabricación de uno y otro caso, ya que el proceso de diseño suele ser mucho más complejo para el caso de los *soft robots*, especialmente en términos de control.

Para cerrar el las motivaciones para el estudio de *soft robots*, ha de comentarse la capacidad inherente que tienen estos mecanismos para generar deformación continua en el espacio, y conseguir así combinaciones de posiciones de sus elementos con gran complejidad.

Tanto con robots rígidos como con robots flexibles pueden conseguirse estructuras hiper-redundantes, y con movilidad certera. Sin embargo, los *soft robots* distribuyen su deformación con teóricos infinitos grados de libertad. Ello supone que el extremo del robot puede llegar a todos los puntos de su espacio de trabajo con un número infinito de configuraciones para su forma.

Además, su diseño permite por lo general variar sus dimensiones en función de la acción de control llevada a cabo, consiguiendo así hacer pasar al robot por huecos pequeños y de difícil acceso, lo cual les hace aptos para labores de inspección o rescate, entre otras, accediendo a lugares y en posiciones impensables para los robots tradicionales. También son capaces de transportar objetos frágiles (aunque poco pesados) sin dañarlos.

1.1 OBJETIVOS DEL TFG

Los objetivos marcados al inicio del trabajo pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Diseño de un *soft robot* caminante de tipo FEA (Fluidic Elastomer Actuator), de actuación neumática, siguiendo varias iteraciones de mejora y estudio de diversas configuraciones que optimicen su locomoción.
- Construcción del diseño obtenido, empleando para ello materiales y métodos de construcción de robots poco comunes, tales como silicona de catalización por platino, moldeada a partir de recipientes de impresión en 3D.
- Diseño de una interfaz de interacción robot-humano en Matlab, para el control de las secuencias de marcha del caminante.
- Diseño y construcción de una instalación neumática apropiada para el funcionamiento del robot.

1.2 ESTRUCTURA

La memoria del proyecto comienza con una exposición del estado, pasado y presente, del campo de la robótica flexible, haciendo hincapié en los diferentes métodos constructivos y técnicas de desarrollo y control. Posteriormente se enumeran las herramientas y materiales empleados en el proyecto, antes de comenzar con la exposición del proceso de diseño que lleva al resultado final del trabajo. Se expone tanto el desarrollo mecánico (métodos de análisis, etc.) como el desarrollo de las secuencias y herramientas de control necesarias para el funcionamiento del robot. Por último, se exponen la metodología de ensayos, los resultados, y la discusión de los mismos, en base a los parámetros de control sobre los que se tiene dominio. La última parte del trabajo recoge la planificación temporal del proyecto, así como su presupuesto.

1. INTRODUCCIÓN

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Se pretende a continuación dar una visión de la situación actual en el ámbito de la robótica flexible, recorriendo para ello parte de las características que identifican este tipo de dispositivos, y los aspectos básicos que son tenidos en cuenta a la hora comenzar el diseño de un *soft robot*.

Ya se ha comentado el tremendo potencial que se esconde detrás de la posibilidad de forzar al *soft robot* a adoptar posturas intrincadas o formas complejas.

La razón por la cual los robots tradicionales ven limitada la complejidad de sus posiciones es la siguiente: la estructura básica actual se compone de diferentes cuerpos rígidos de forma más o menos compleja, que se ponen en relación empleando juntas (articulaciones) con capacidad motriz (impulsadas por motores eléctricos, o actuadores neumáticos o hidráulicos)[6],[8]. Las articulaciones permiten ciertos movimientos relativos entre elementos, denominados grados de libertad.

Lo intrincado de la forma que puede obtener un robot para alcanzar una cierta posición en el espacio depende, fundamentalmente, del número de articulaciones entre su base (referencia fija), y el punto extremo de actuación [14], [18], [19]. Cuanto mayor es el número de articulaciones y el número de grados de libertad permiten dichas articulaciones, mayor es la complejidad de la forma que puede obtener la posición relativa de los cuerpos rígidos.

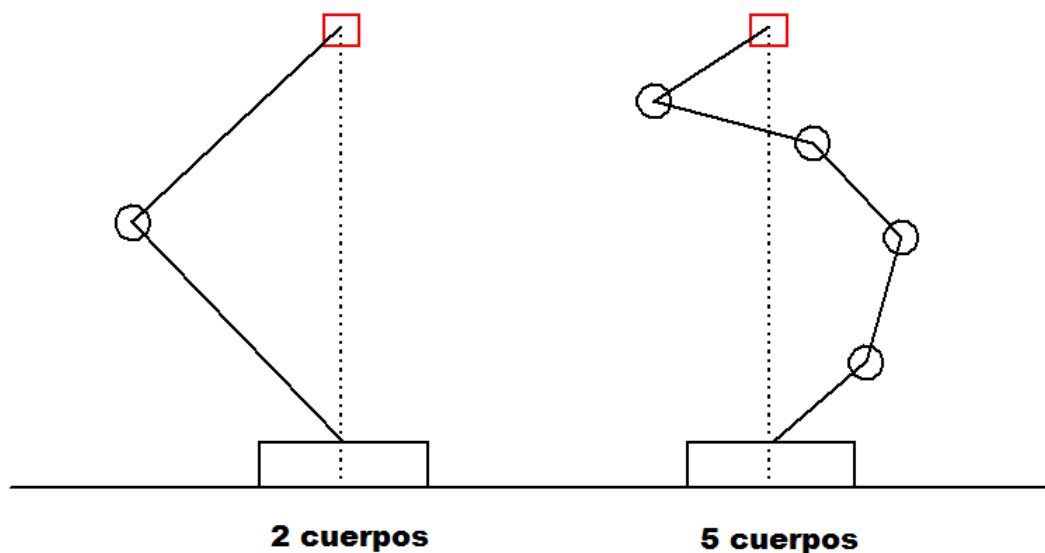


Figura 2-7: Variación en la complejidad de la posición final de un robot para alcanzar un mismo punto, en función del número de cuerpos que lo integran.

Derivado de lo anterior, pues, estructuras con cuerpos muy pequeños y articulaciones permisivas entre ellos consiguen trazar movimientos de gran complejidad. Sin embargo, la construcción de robots con tales características tiene un límite de aplicación práctica. No puede dividirse infinitamente el elemento en otros más pequeños, entre otros motivos por la

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

imposibilidad de fabricar, a través de métodos tradicionales, dichos cuerpos. Igualmente, las uniones también tienen un determinado tamaño que no es divisible.

Podría plantearse entonces la construcción de un robot empleando únicamente articulaciones puestas en serie. Se trata del límite de aplicación práctica del sistema creado por concatenación de sólidos rígidos, y aun así la estructura presentaría una determinada rigidez, ya que las articulaciones son sólidas, construidas con material metálico, y por tanto no deformables [5].

Más allá de los límites útiles de construcción, la división recurrente del cuerpo en otros de menor tamaño resulta en un problema de creciente dificultad en términos de control [11]. Multiplicar el número de articulaciones supone multiplicar también el número de señales a controlar por la lógica de control establecida, necesitando pues no sólo de una mayor capacidad de procesamiento (algo relativamente sencillo de obtener con los ordenadores de hoy en día), sino también una programación que permita la coordinación de todos los elementos entre sí de forma precisa.

El problema expuesto marca, de este modo, el límite de la técnica de construcción tradicional de robots. Es aquí donde los *soft robots* muestran uno de sus puntos fuertes: el modo de deformación de los materiales empleados [4], [5], [9], [16]. Sus propiedades (blandos, ligeros y altamente deformables) proveen al diseño de unas características únicas, que permiten un cambio de filosofía a la hora de afrontar el estudio y diseño de los mismos.

El desarrollo de *soft robots* intenta sustituir parte de las habilidades de la máquina que procesa el sistema de control, por otras análogas y más eficientes que aprovechan las propiedades de los materiales de construcción y la morfología de sus cuerpos para conseguirlas.

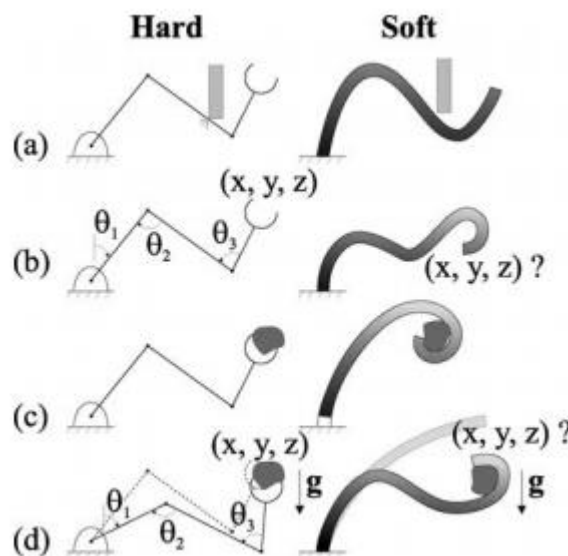


Figura 2-8: Posibilidades de los robots rígidos y flexibles: (a) destreza, (b) detección de posición, (c) manipulación y (d) carga.

Uno de los pilares fundamentales a la hora de conseguir esa transferencia y sacar el máximo partido de los materiales es el modo de construcción empleado. En la mayoría de técnicas de manufactura, se recurre al moldeo del material obteniendo un cuerpo continuo con las propiedades citadas [5]. Se consiguen así grandes superficies que permiten distribuir mejor

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

el esfuerzo, incrementar el tiempo de contacto, y reducir las fuerzas de impacto, siendo absorbidas también en mayor grado que por materiales rígidos [5], [6], [8].

Sin embargo, al igual que presentan multitud de ventajas, las estructuras de imitación biológica tienen importantes limitaciones. De nuevo recurriendo a la observación de la naturaleza, se comprueba que los organismos que presentan este tipo de estructuras tienden a ser pequeños, debido a la dificultad que supone soportar su peso propio [9]. De hecho, todos los invertebrados de gran tamaño se encuentran en el agua (cefalópodos) o bajo tierra (nematodos de gran tamaño), donde el entorno les ayuda a soportar su peso.

El mismo tipo de limitaciones pues, se puede aplicar a la construcción y desarrollo de *soft robots*. Es necesario tener en cuenta la funcionalidad para la que se diseña el robot, para hacer una adecuada selección del tamaño y el material a emplear.

Adicionalmente, las propiedades de absorción de energía de los tejidos que se emplean en su construcción les impiden ejercer grandes fuerzas de inercia, y limitan la velocidad a la que se pueden mover [9].

Ello hace que, por lo general, en robots terrestres de tamaño mayor que una rata sea necesario incorporar componentes de rigidez mayor, para aprovechar toda la potencialidad que ofrecen los materiales blandos citados anteriormente [9].

2.1 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, DISEÑO Y FABRICACIÓN

Uno de los desafíos que presenta la fabricación de *soft robots* es el manejo de los materiales de construcción. Las técnicas de ingeniería actuales se adaptan bien a la construcción de robots rígidos, y están muy desarrolladas. Pero cuando se manipulan materiales elásticos y no lineales como es el caso de los empleados en estos novedosos robots, muchas de las asunciones que se hacen válidas para el trabajo de los sólidos metálicos dejan de tener efecto [5].

Son varios los desafíos técnicos que han de superarse:

- Son necesarios métodos de fabricación de ‘módulos unidad’ que permitan crear morfologías adecuadas para tareas de locomoción y manipulación, sin perder de vista la necesidad de ensamblar dichos módulos entre sí.
- Es necesario que los módulos diseñados y fabricados repitan sus propiedades (elasticidad del material, canalizaciones interiores, etc.) de forma consistente en diferentes tandas de fabricación. Esto es, se necesita asegurar la repetibilidad del proceso.

Persiguiendo dichos objetivos, se han desarrollado varias técnicas de manufactura en los últimos años. Su fase de desarrollo es aún primaria, y constantemente aparecen mejoras que permiten diseños con mayores funcionalidades, y más sencillos de ejecutar [5], [9].

Una de las formas comunes de clasificación de *soft robots* es aquella que atienden al tipo de actuación que se ejerce sobre la máquina para su control. El tipo de actuación de estos robots está íntimamente relacionado con el material de construcción y la forma de control, por lo que su estudio permite segmentar las diferentes familias.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Así pues, la forma en la que los sistemas de transmisión de potencia se distribuyen a lo largo de los cuerpos, permiten hacer la siguiente clasificación [5].

- *Soft Robots* contruidos a base de Aleaciones con Memoria de Forma: el principio básico de operación detrás de este tipo de aleaciones SMA (del inglés *Shape Memory Alloy*), es la capacidad de contracción del material cuando se calienta por efecto joule, al ser atravesado por corriente eléctrica.

La aleación de uso más extendido entre la comunidad robótica es el Nitinol. Su nombre se debe a su composición (Níquel y Titanio). Al calentarse por el efecto descrito anteriormente, sufre una transformación microestructural de fase gamma (austenítica) a martensítica. El cambio de fase conlleva un cambio de densidad, que hace que el material se expanda o comprima. Actuando sobre este efecto de manera adecuada se consigue la deformación deseada.

Empleando estas propiedades se han construido estructuras a partir de entramados de cables de Nitinol, en los que se entrelazan adecuadamente cables de efectos antagonistas, consiguiendo mediante su actuación posturas y movimientos de extrema complejidad [20].

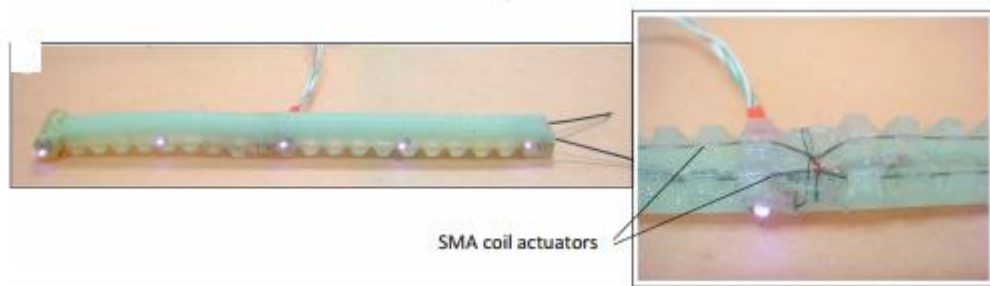


Figura 2-9: Soft robot a accionado a través de cables de nitinol de tipo SMA [9].

La gran desventaja del empleo de aleaciones con memoria de forma reside en los tiempos de respuesta del material a las excitaciones eléctricas. Su velocidad de reacción es muy variable: debido a que se contraen cuando su temperatura llega a cierta temperatura de activación predefinida por su composición química; alambres muy delgados son capaces de contraerse en una décima o centésima parte de un segundo. Sin embargo, para relajarse de nuevo necesitan enfriarse, lo cual depende de la temperatura ambiente [20], [21].

Se puede llegar a tener, pues, una frecuencia elevada (varios ciclos por segundo) con alambres de poco diámetro (50 micrómetros). Dicha frecuencia disminuirá conforme aumente la sección del material y la temperatura ambiente. Como norma general, este tipo de aleaciones tarda entre dos veces y tres veces más en relajarse que en contraerse [21].

Por último, se destaca la biocompatibilidad del Nitinol, lo que le permite ser usado en aplicaciones médicas, tales como tratamiento de fracturas, u operaciones de bypass [20].

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Un ejemplo de *soft robot* construido con este tipo de actuadores es el ‘Omegabot’, capaz de avanzar sobre superficies con inclinación [22].

- *Soft Robots* contruidos a base de cables: algunos prototipos han sido contruidos empleando un esquema de actuación basado en tendones que accionan elementos rígidos embebidos en una estructura blanda de elastómero. La forma de control más extendida para los tendones es el empleo de servomotores controlados a través de una secuencia lógica de control [5].

Para ilustrar este tipo de *soft robots* se cita el trabajo desarrollado en el Massachusetts Institute of Technology [23], en el que se construye un robot que imita el comportamiento de un pez en medio acuático.

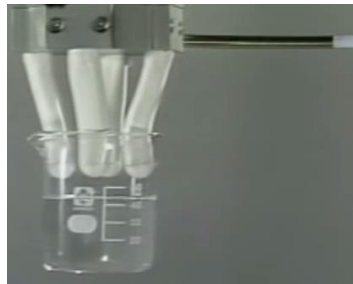


Figura 2-10: *Soft robot* accionado a través de cableado interno, embebido en una estructura de silicona [5].

- *Soft Robots* contruidos a base de músculos neumáticos artificiales: otra aproximación frecuente de esquema de construcción se basa en distribuir de forma adecuada actuadores tipo PAM (Pneumatic Artificial Muscles), también conocidos como actuadores de McKibben [5]. Se tratan, fundamentalmente, de tubos huecos de material elástico, cuyo exterior se refuerza con una malla trenzada, de un material de mayor rigidez.

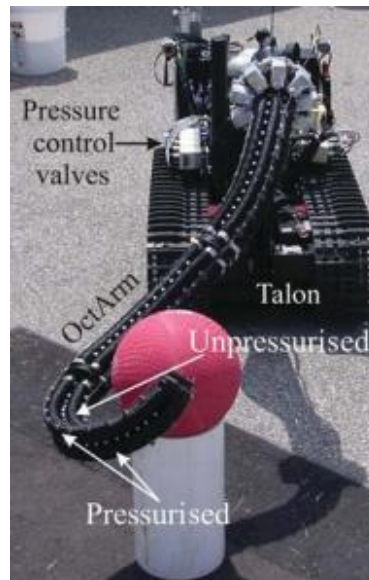


Figura 2-11: Actuador flexible OctArm construido empleando actuadores de tipo McKibben [25].

En función del diseño de dicha malla, el actuador es capaz de contraerse o expandirse ante la entrada de fluido a presión en su cámara elástica. De nuevo, en muchas ocasiones se disponen en parejas antagonistas creando así estructuras de

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

funcionalidad similar a un cilindro de doble efecto, o a la de parejas de músculos biológicos tales como el conjunto biceps-triceps [24]. Uno de los ejemplos con mejor resultado de este tipo de actuadores es el OctArm [25].

- *Soft Robots* contruidos a base de Elastómeros accionados por Fluido: la alternativa más blanda de las desarrolladas hoy en día, y la que se va a exponer a lo largo del trabajo. Su esquema de construcción se basa en el vertido de silicona líquida en un molde adecuado. Del mencionado molde se consigue extraer, tras el proceso de curado, un macizo de elastómero que contiene conductos y canalizaciones a modo de vejigas, que serán infladas adecuadamente para conseguir la deformación que proporciona el movimiento.

El rango de presiones de entrada del fluido al cuerpo se mueve entre 2 y 6 bares, dependiendo fundamentalmente del material y la rapidez con la que se espera conseguir la deformación. Igualmente importante es la regulación del caudal proporcionado por la fuente neumática.

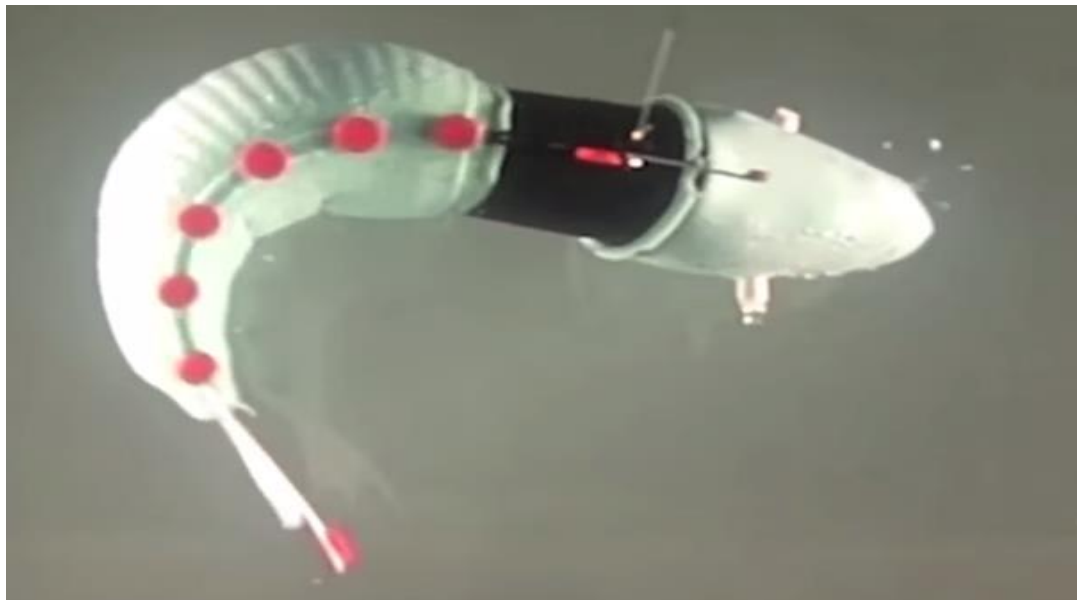


Figura 2-12: Soft robot de tipo FEA inspirado en el comportamiento de un pez, y que actúa en medio acuático a través de aire a presión [2].

Empleando actuadores de este tipo se consiguen mecanismos de locomoción muy primitivos, tales como extensión, contracción y doblado. Es precisamente esta última forma de actuación la que inspira el presente trabajo, y la que por consiguiente se expondrá de forma detallada más adelante.

Pese a la simplicidad de los movimientos empleado, la combinación de los mismos permite desarrollar, entre otros, robots caminantes, y *grippers*.

Si bien el problema de control es un denominador común en el campo de la robótica blanda, en el caso de esta familia es especialmente crítico, pues el principio de operación tiene un alto grado de variabilidad en su resultado, y en muchas ocasiones es difícil prever el comportamiento de un determinado diseño.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

La terminología inglesa emplea el acrónimo FEA (Fluidic Elastomer Actuators) para referirse a este tipo de *soft robots*.

El ejemplo más famoso de este tipo de *soft robots* es el desarrollado en Harvard en 2011 [7].

La exposición anterior, además de mostrar las diferentes formas de construcción, puede usarse para ordenarlos en orden creciente de rigidez. Los robots a base de mallas de Nitinol son los más rígidos que se construyen en la actualidad, mientras que los FEAs ejemplifican el extremo opuesto.

Sin embargo, dicha calificación de rigideces no es estrictamente cerrada. No es extraño encontrar trabajos en los que se han puesto en relación varios mecanismos de actuación para enriquecer las posibilidades de deformación del robot, y conseguir así formas más complejas, mayores cargas, o locomociones más veloces [1], [3], [5], [10].

Es el caso de los FEAs reforzados con fibra, que vienen a ocupar el espacio entre el actuador FEA y la estructura PAM. Puesto en otras palabras, se trata de una evolución de los músculos neumáticos, empleando para la construcción de las cámaras internas elastómeros o silicona similares a los empleados para los FEA. Las mencionadas cámaras cambian también su geometría, y pasan de ser meros depósitos elásticos, a convertirse en un intrincado de tuberías más o menos complejas y de actuación independiente, con las que lograr mayores posibilidades de deformación. Por último, la superficie del elastómero es recubierta con la malla trenzada de material algo menos elástico que la silicona, pero que aporta la rigidez necesaria para su empleo en condiciones de mayor sollicitación. Las presiones de trabajo para este tipo de híbridos se elevan hasta los 10 bares [5], [8].

Otros proyectos aún en desarrollo combinan estructuras rígidas internas, a modo de esqueleto, con exteriores de tejido blando, aprovechando sus propiedades de adaptabilidad al terreno, agarre y deformación para mejorar el mecanismo original. Es el caso de los estudios y el desarrollo del robot *Roboy*, llevados a cabo en la Universidad de Zúrich [8].

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE



Figura 2-13: Proyecto Roboy [8], en el que se construyó un humanoide de inspiración biológica movido por tendones flexibles. Como aditivo romántico al proyecto, se estructuró en 9 meses, al igual que la gestación humana.

Las herramientas disponibles para el diseño de *soft robots* son limitadas, en especial si se comparan con la gran cantidad de métodos desarrollados para el cálculo de robots rígidos (o estructuras de la misma índole, en general). En la actualidad, existen varias familias de herramientas de software para el diseño de robots flexibles.

A) Software de Elementos Finitos.

El método de cálculo por elementos finitos resuelve ecuaciones diferenciales conocidas, sobre un espacio geométrico dado, que se discretiza en pequeños elementos, para los cuales se resuelve el cálculo independientemente.

Para la resolución del problema, es necesario definirlo con cierto grado de detalle: a parte de la geometría concreta de la pieza a analizar, han de darse las restricciones de su movimiento y los fenómenos físicos en el instante inicial de la simulación sobre el mismo (condiciones de contorno e iniciales del problema) [26]. De este modo, se calcula la deformación que sufre el cuerpo del robot bajo un determinado caso de carga mecánica o térmica.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

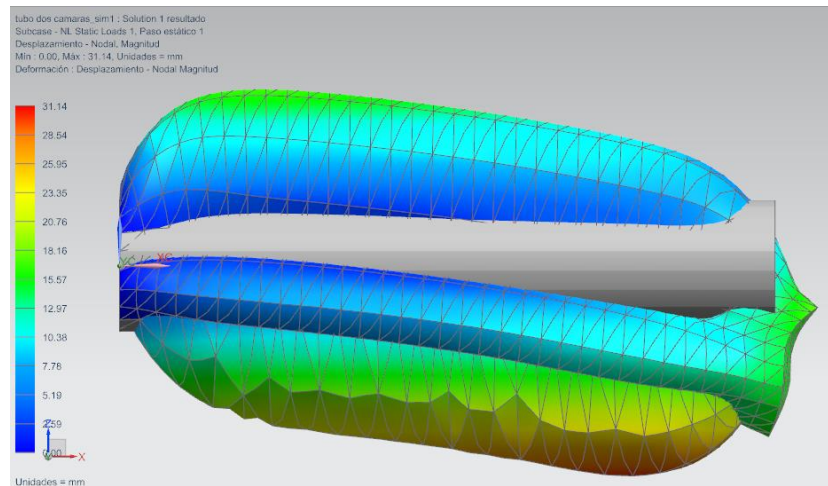


Figura 2-14: Análisis por elementos finitos de un actuador tipo FEA.

Si bien el uso del método de los elementos finitos está ampliamente extendido en la ingeniería, de nuevo, la juventud de los materiales y diseños de *soft robots* limita su uso. Los problemas que enfrenta habitualmente son los siguientes [5]:

- Caracterización del material: las bibliotecas comerciales no disponen de siliconas, resinas, uretanos, aleaciones de nitinol, u otros materiales de construcción. Es por tanto necesario llevar a cabo ensayos previos que permitan determinar las propiedades físicas del material en cuestión. Entre los pruebas que se realizan comúnmente, están:
 - Ensayos de tracción y compresión: que permiten obtener las propiedades elásticas del material (módulo elástico, coeficiente de Poisson, etc.)
 - Ensayos de conductividad eléctrica: importantes para la construcción de estructuras de Nitinol.
 - Ensayos de conductividad térmica: se suele emplear el método del 'hilo caliente' para analizar los valores de conductividad, disipación de calor y dilatación térmica de los materiales.
- Conocimiento de las condiciones exactas de trabajo: especialmente en el caso de los FEAs, es imposible conocer de forma exacta la distribución de presiones que se extiende en las superficies interiores. A parte de la posible variabilidad de dicha distribución consecuencia de la geometría (concentración de tensiones en zonas geoméricamente comprometidas), es necesario también estimar el valor real de presión que reciben las paredes, función del volumen de aire introducido a la vejiga, la presión del mismo, la compresibilidad del gas, y la rigidez elástica de las paredes. Es un problema fluidodinámico complejo, análogo al del hinchado de un globo, pero que emplea geometrías más complejas, y por lo tanto presenta ecuaciones de equilibrio mecánico más difíciles de resolver [3], [5].

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

- Conocimiento del entorno de trabajo: si bien se puede simular el contacto entre elementos, resulta poco significativo estudiar casos particulares si se pretende utilizar el robot en un amplio rango de entornos. Además la simulación de elementos finitos no es dinámica [26]: esto es, es capaz de aportar la solución final de deformación y esfuerzos, pero no permite la modificación en tiempo real del caso de resolución. Esto limita la aplicación del mismo para estudiar secuencias de marcha, y las posibles desviaciones frente a interferencias externas que puedan darse en las mismas [3].

B) CFD.

Una evolución del método de elementos finitos es el uso de software CFD (del inglés *Computer Fluid Dynamics*), que permite la simulación de flujo de fluidos. El campo de aplicación de esta tecnología se limita a los músculos McKibben, y a los FEAs.

El empleo de este tipo de herramientas permite obtener valores instantáneos (dinámicos) de presión, caudal y temperatura, entre otros, de la corriente fluida. Del mismo modo poseen herramientas de representación de las corrientes que permiten una visualización del problema para facilitar su comprensión.

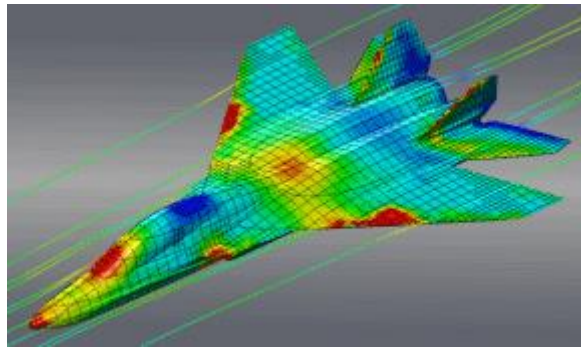


Figura 2-15: Imagen de un análisis CFD de un software comercial.

Sin embargo, de nuevo aparece el problema recurrente de la caracterización material de los materiales de construcción. Los simuladores CFD actuales trabajan fundamentalmente con materiales rígidos. Es difícil encontrar comercialmente un software que permita definir materiales elásticos, flexibles y con complianza como los de uso en construcción de *soft robots*.

C) Motores de comportamiento físico

El desarrollo reciente de la industria del videojuego ha tenido como resultado simuladores de física que permiten la interacción en tiempo real con el elemento simulado, pudiendo observar su evolución ante diferentes excitaciones. De este modo, puede comprobarse el comportamiento del *soft robot* ante entornos cambiantes y excitaciones variables. Esto permite ajustar y comprobar la importancia de la fricción con las superficies de apoyo, o la relevancia de coordinar adecuadamente las excitaciones sobre los diferentes cuerpos del robot para obtener secuencias de marcha efectivas [3].

Para poder mover la potencia de procesamiento que desarrollan estos motores físicos, y permitir su visualización en tiempo real, ha sido necesario el desarrollo de potentes unidades de procesamiento gráfico (GPUs, *Graphic Processing Unit*). La combinación de ambos, motor de simulación y motor gráfico se agrupa bajo el acrónimo GPGPU, del inglés *General-Purpose*

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Computing on Graphics Processsing Units. Entre los actuales, destaca por su potencia el NVidia PhysX [3].

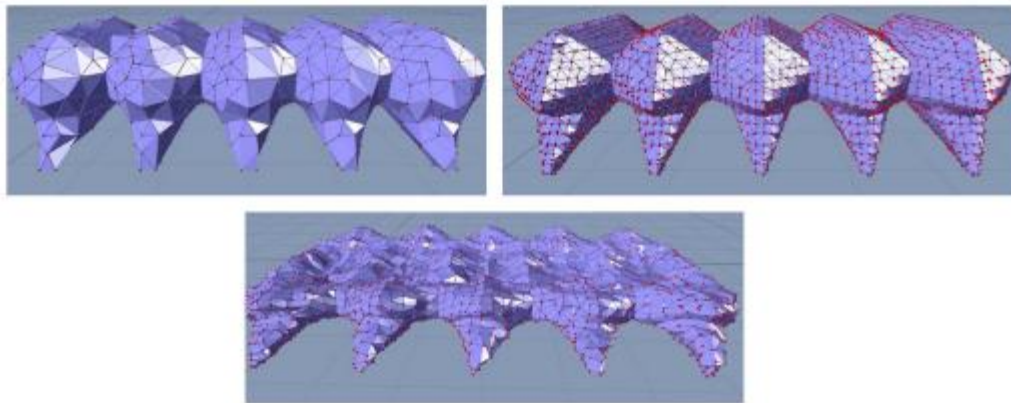


Figura 2-16: Modelización y comportamiento de un cuerpo de naturaleza blanda analizado con el software NVidia PhysX [3].

Otra herramienta más sencilla y que permite una aproximación a la simulación en entorno físico es el software VoxCAD [1], [3], [28]. El funcionamiento del mismo se basa en la construcción de cuerpos a base de pequeñas celdas unidad, denominadas *voxels*. La geometría de dichas celdas puede seleccionarse dentro de una lista de elementos geométricos básicos, tales como esferas, cilindros y cubos.

La gran potencialidad de VoxCAD reside en la posibilidad de asignar un material diferente a cada *voxel* del cuerpo, enriqueciendo de este modo la complejidad estructural que puede obtenerse [28].

La simulación de *soft robots* en VoxCAD se limita a los de tipo FEA. Sin embargo, el programa presenta ciertas limitaciones:

- Las geometrías que pueden obtenerse empleando los voxels unidad son relativamente sencillas y simplistas.
- No existe la posibilidad de simular distribuciones de presiones sobre superficies.
- No se pueden simular flujos de fluido.

Teniendo cuenta las limitaciones citadas, en especial las dos últimas, es necesario explicar la forma en que VoxCAD puede realizar simulaciones de robots tipo FEAs que aporten datos de interés.

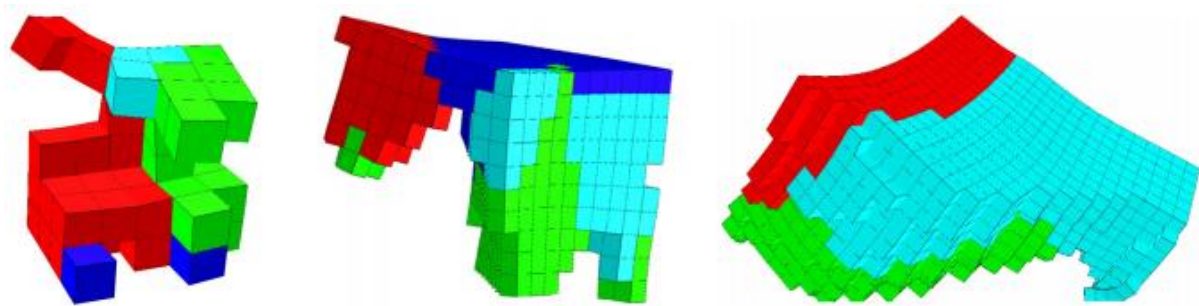


Figura 2-17: Diferentes diseños de cuerpos flexibles diseñados y analizados empleando VoxCAD [1].

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

El principio de operación del software se basa en la posibilidad de caracterización de cada voxel de manera individual. Entre las propiedades físicas que han de indicarse se encuentra el coeficiente de dilatación térmica con la temperatura, con el que pueden definirse materiales antagonistas (con coeficiente positivo y negativo, respectivamente) [3], [28].

A la hora de llevar a cabo la simulación, es posible hacer oscilar la temperatura del entorno en torno a un valor medio, consiguiendo así expansiones alternativas en los voxels antagonistas, que combinadas adecuadamente permiten diseñar secuencias de marcha.

Junto con ello, el VoxCAD permite una simulación de las condiciones de contacto (coeficientes de rozamiento estático y dinámico) del material con el entorno, e incluso consigo mismo. Como se explicará más adelante, el fenómeno de fricción entre superficies gomosas y el suelo es lo que permite el avance efectivo de los *soft robots* sobre una superficie [3], [4], [5].

D) Optimización con código genético

Hace tres décadas, Karl Sims desarrolló lo que denominó ‘criaturas virtuales evolucionadas’ [1], lo que no eran más que organismos artificiales generados a partir de materiales rígidos, y simulados en ordenador. Gran parte del trabajo de Sims se basó en generar código informático que imitaba la evolución genética de los organismos, y que era capaz de optimizar en poco tiempo las estructuras generadas a partir de los materiales citados.

Sin embargo, el desarrollo de esta interesante aproximación a la optimización de organismos de forma virtual, rápidamente vio frenado su avance por el siguiente motivo: los materiales, rígidos, que utilizaban sus simulaciones, permitían poca optimización y complejidad de las estructuras obtenidas.

En los últimos años, y siguiendo el trabajo desarrollado en la década de los 90, se ha retomado la investigación con códigos evolutivos, a los que ahora se proporciona la opción de simular una amplia variedad de materiales, y combinarlos entre sí [1], [3]. Como resultado, las estructuras generadas ‘aleatoriamente’ durante el proceso evolutivo simulado, son de creciente complejidad conforme se optimiza el código, y más efectivas en sus objetivos.

En función de dichos objetivos, el código premia o penaliza el diseño obtenido, y rechaza así soluciones poco eficaces, mientras que continúa desarrollando el cálculo con aquellas que son mejores.

Cabe mencionar que para llevar a cabo la simulación de los materiales flexibles, se emplea el software VoxCAD [28] mencionado anteriormente, gracias a su eficiente simulación de la estática, dinámica y deformación no lineal de los cuerpos blandos y heterogéneos.

Los resultados de esta línea de investigación demuestran que al expandir el espectro de materiales en la simulación de robots evolutivos, incluyendo materiales blandos que se asemejan al tejido orgánico o los músculos, consiguen generar morfologías complejas, similares a las biológicas, y más interesantes.

2.2 CONTROL

Las grandes posibilidades que ofrecen los *soft robots* en términos de movilidad y complejidad, representan problemas de control para los que hoy en día no se ha desarrollado una teoría general que permita predecir el movimiento de estas estructuras. En muchas ocasiones, la terminología inglesa emplea el término *unconstrained*, ‘sin restricciones’

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

traducido al castellano, para referirse al modelado de las mismas, y da una idea de la complejidad del problema a resolver [9].

| | Rigid | Discrete hyperredundant | Hard continuum | Soft |
|-----------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Properties | | | | |
| df | Few | Large | Infinite | Infinite |
| Actuators | Few, discrete | Many, discrete | Continuous | Continuous |
| Material strain | None | None | Small | Large |
| Materials | Metals, plastics | Metals, plastics | Shape memory alloy | Rubber, electroactive polymer |
| Capabilities | | | | |
| Accuracy | Very high | High | High | Low |
| Load capacity | High | Lower | Lower | Lowest |
| Safety | Dangerous | Dangerous | Dangerous | Safe |
| Dexterity | Low | High | High | High |
| Working environment | Structured only | Structured and unstructured | Structured and unstructured | Structured and unstructured |
| Manipulable objects | Fixed sized | Variable size | Variable size | Variable size |
| Conformability to obstacles | None | Good | Fair | Highest |
| Design | | | | |
| Controllability | Easy | Medium | Difficult | Difficult |
| Path planning | Easy | Harder | Difficult | Difficult |
| Position Sensing | Easy | Harder | Difficult | Difficult |
| Inspiration | Mammalian limbs | Snakes, fish | | Muscular hydrostats |

Tabla 2-1: de propiedades y características de diferentes tipos de robot, en función de sus materiales de construcción y mecanismos de deformación [5].

En el diseño de robots industriales, se conoce de antemano el espacio de trabajo, y la tarea a realizar por la máquina [5], [13]. De igual forma, se tiene un amplio conocimiento de los grados de libertad y formas de desplazamiento que permiten sus articulaciones. Este grupo de variables, limitadas, necesitan de sistemas más o menos complejos de control, pero cerrados, conocidos y modelables con relativa facilidad, y para los cuales existe extensa bibliografía.

En contraposición, los *soft robots* ofrecen ‘infinitos’ grados de libertad. Esto es, dadas dos partículas adyacentes de su volumen, no existen restricciones de movimiento relativo entre ellas [5].

Tomando un sistema cartesiano de referencia fijo en una de las partículas, otra contigua a ella puede desplazarse relativamente en las tres direcciones, y rotar en los otros tres grados de libertad, a través de los que se puede modelar como acoplamientos elásticos (muelles y muelles de torsión). La rigidez de los muelles viene determinada por las características del material empleado. En el caso particular de los *soft robots*, dicha resistencia al desplazamiento es de pequeña entidad, y los cuerpos son altamente deformables bajo cargas pequeñas [5].

Al extender la analogía expuesta al conjunto de partículas que integran el cuerpo del robot, se obtiene un cuerpo de deformación continua, con infinitos grados de libertad.

Tal y como se expuso en la introducción del trabajo, uno de los grandes atractivos del empleo de *soft robots* reside en su capacidad de alcanzar cualquier punto del espacio de trabajo, pudiendo para ello emplear infinitas configuraciones de deformación en su cuerpo.

Dado dicho sistema, es imposible resolver sobre él el conjunto de ecuaciones diferenciales de la dinámica. En sólidos lineales el problema de integración es complejo y da lugar a intentar resolver los problemas por métodos de cálculo como el de los elementos finitos. En *soft robots*, los materiales pierden su linealidad, complicando extraordinariamente el problema, y haciéndolo, a día de hoy, imposible de resolver con exactitud [10], [16].

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Ya se ha comentado anteriormente como herramientas como los elementos finitos o los simuladores físicos se emplean en el proceso de diseño para identificar el modo de deformación que presentará el prototipo final. Estos análisis permiten optimizar la geometría maximizando la deformación para un mismo volumen de material.

Sin embargo, es complicado generar el sistema de control basando los cálculos en las resoluciones que plantean dichos métodos. Es por ello por lo que es necesario desarrollar otra metodología de trabajo que permita controlar de manera relativamente sencilla el cuerpo del robot.

El proceso de diseño ayuda a identificar las formas básicas de deformación que sufre el *soft robot* (extensión/compresión lineal, curvatura, giro, etc.). Dichos modos de deformación se definen como los grados de libertad ‘macroscópicos’ del robot, y serán el objeto de estudio y control por parte del sistema de regulación [4], [10].

Un problema inherente en el control de *soft robots* es la implementación de un bucle cerrado de procesamiento que permita explotar parte de las ventajas explicadas, tales como la adaptabilidad al medio o la habilidad para moverse en espacios pequeños o confinados.

Por simplicidad, muchas aplicaciones, incluida la desarrollada en este trabajo, emplean secuencias en bucle abierto obtenidas y optimizadas a base de repetir un cierto ensayo un número de veces [3], [5]. Sin embargo, en los centros de investigación más punteros ya se han conseguido aplicaciones en bucle cerrado [10], basadas fundamentalmente, en el control y procesamiento de imágenes obtenidas con una cámara externa al montaje, que permiten calcular la dinámica inversa del robot y regular la actuación sobre el fluido, el tirante, o la señal eléctrica que genera el movimiento del robot.

Sin embargo, para un control preciso de *soft robots*, es necesario un modelo basado en la predicción de conjuntos de configuraciones de deformación posibles. A día de hoy, los sistemas dinámicos que permiten describir las deformaciones a gran escala, cubriendo el espacio de trabajo del *soft robot*, son muy complicados de usar, y están en fase de desarrollo. Elementos como la fuerza de la gravedad, la estabilidad estructural o la combinación de materiales multi-material y de sección variable son desafíos aún por resolver.

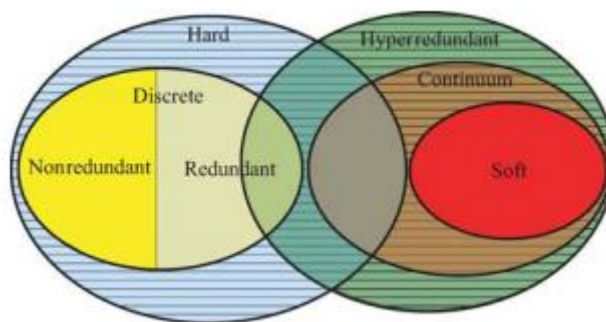


Figura 2-18: Esquema de la organización global de los tipos de robots existentes, en función de sus materiales, deformación, y grados de redundancia [5].

Un problema añadido para equiparar la usabilidad de los *soft robots* a la de sus análogos rígidos hiper-redundantes, es la capacidad de planificar/identificar las trayectorias más

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

favorables para el avance. Es sabido que una estrategia de navegación avanzada puede mejorar las capacidades de movimiento de cualquier robot, tal y como ocurre con los organismos vivos. Sin embargo, en el caso de los robots flexibles, la planificación de rutas es complicada por la multitud de formas que pueden llevar a la misma posición final de su extremo.

La forma típica que se emplea para resolver este problema consiste en la elaboración de un ‘mapa probabilístico de rutas’ (del inglés PRM, *Probabilistic RoadMapping*). La estrategia de cálculo se basa en generar un gran número de configuraciones iniciales aleatorias, de las cuales se seleccionan aquellas que sin conducir a una colisión con el entorno, necesitan de una menor energía de deformación.

Esta aproximación al problema tiene importantes limitaciones, que lo hacen difícil de poner en práctica a día de hoy. Por una parte, los métodos probabilísticos tienden a ser costosos en términos de computación, ya que necesitan generar varios puntos en el espacio disponible para cada posición del robot, las cuales aumentan exponencialmente al hacerlo el número de grados de libertad de la estructura (ya se ha comentado que los *soft robots* estarían compuestos de forma teórica por infinitos grados de libertad). Además, los métodos disponibles hoy en día no tienen en cuenta las restricciones impuestas por las propiedades del material de construcción en su interacción con el entorno (contactos, fricción, etc.).

2.3 APLICACIONES

Una vez hecho un repaso a las características y el estado actual del campo de la robótica flexible, se cierra este capítulo recopilando ejemplos de diferentes *soft robots* desarrollados por laboratorios de universidades de todo el mundo [3], [5], [9], [11].

- A) Exoesqueletos: en contraposición a aquellos contruidos a base de elementos rígidos, los exoesqueletos contruidos con tecnología flexible tienen ciertas ventajas que probablemente supongan el futuro de este tipo de tecnología. En primer lugar, son capaces de adaptarse al contorno del usuario tanto en reposo como en el proceso de deformación. Además, la fuerza ejercida por los actuadores del robot, se distribuyen a lo largo de la estructura, en lugar de introducirla en las articulaciones (como hacen los exoesqueletos tradicionales). Todo ello permite movimientos mucho más naturales y suaves. Los exoesqueletos flexibles tienen uso en tratamientos de rehabilitación fisioterapéutica, y en labores de equipamiento de rescate (para operarios que tengan que recorrer largas distancias a pie).



2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Figura 2-19: Exoesqueleto construido a base de músculos de McKibben, que facilita la rehabilitación en pacientes con dificultad para caminar [11].

- B) *Grippers*: otra de las aplicaciones por excelencia en las que el uso de *soft robots* supone una mejora sobre el diseño con elementos rígidos son las pinzas para el agarre y manipulación de objetos de forma relativamente compleja. La capacidad inherente de deformación de los materiales empleados en robots flexibles permite que el extremo manipulador se adapte de manera precisa al contorno del objeto con el que interaccionan, mejorando así el agarre y la precisión de operación. Además, los diseños creados con *soft robots* se alejan de la estructura tradicional de *gripper*, abordando el problema a través de manipuladores con movimientos más naturales y complejos.

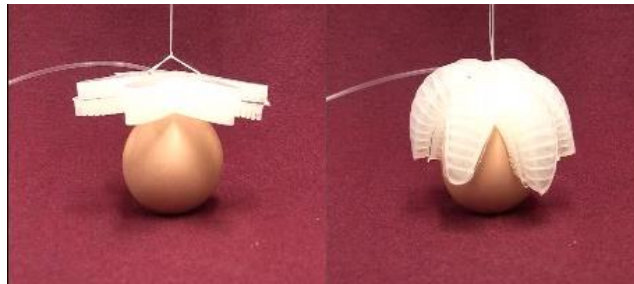


Figura 2-20: Robot FEA de tipo 'gripper', capaz de adaptarse a la forma de un objeto, y ejercer la presión suficiente para elevarlo [11].

- C) *Caminantes*: bajo esta categoría se engloban todos aquellos *soft robots* cuyo objetivo es el avance en el espacio superando el mayor número de obstáculos. Al contrario que en las aplicaciones expuestas anteriormente, cuya construcción empleaba únicamente actuadores neumáticos, en esta familia de aplicaciones se han desarrollado robots funcionales empleando otros actuadores, tales como estructuras de nitinol.

El material de construcción, función del tipo de actuador, determina en gran medida la capacidad de superación de obstáculos o atravesar espacios pequeños que tiene el robot. Construcciones neumáticas en silicona tienen el mayor grado de deformación, y permiten atravesar pequeñas aberturas en paredes, o introducirse en rincones pequeños.

El control de este tipo de robot se basa en la generación de las señales adecuadas, y con el grado necesario de coordinación, para aprovechar adecuadamente la deformación del dispositivo, y su fricción con el suelo, consiguiendo así el avance del mismo.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE



Figura 2-21: Soft robot de tipo FEA, cuadrúpedo, capaz de ejecutar diferentes secuencias de marcha [11].

El empleo de materiales sofisticados, resistentes a las altas temperaturas e ignífugos, ha permitido a los investigadores de la universidad de Harvard [11] crear un robot caminante de rescate, en el que se integran los depósitos neumáticos y el circuito electrónico de control, siendo 100% autónomo durante el periodo de duración de sus reservas de aire comprimido. Gracias a ello puede avanzar por entornos peligrosos, como puede ser un edificio derruido tras un terremoto, transportando una cierta carga de utilidad, como pueden ser fármacos, polvo extintor o un teléfono móvil. Como un caso particular *soft robots* caminantes, pueden mencionarse los robots nadadores. Su principio de actuación es similar al de los caminantes: es necesario diseñar una secuencia de actuación que permita la locomoción del robot, en medio acuático en este caso.

- D) Medicina: a parte de las aplicaciones en tratamientos de rehabilitación explicadas en los exoesqueletos, la medicina ha mostrado interés en los *soft robot* como medio para mejorar los medios quirúrgicos actuales. La tecnología médica más avanzada en el ámbito de cirugía implica el uso de metal rígido, para el tratamiento de tejidos muy delicados. Dichos robots, como ya se ha mencionado anteriormente, necesitan mecanismos de realimentación muy sofisticados para determinar cuanta fuerza es necesaria aplicar a los tejidos y órganos sin dañarlos. Los *soft robots*, por su parte, presentan la ventaja de su tacto flexible, que reduce la probabilidad de dañar el organismo en tratamiento. Se conseguiría aplicando esta tecnología, robots capaces de trabajar en espacios muy pequeños, y siendo reconfigurables y adaptables a la geometría necesaria sin dañar su entorno gracias a su elasticidad. Además, pueden construirse robots desde cero en el espacio de pocos días y a coste bajo en relación a sus homólogos rígidos, pudiendo así emplear las herramientas más precisas en cada caso de intervención quirúrgica.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

3. HERRAMIENTAS Y MATERIALES

A continuación, se pretende recoger de forma resumida las diferentes herramientas que han sido empleadas durante el desarrollo del proyecto, explicando el porqué de su uso, y haciendo una breve introducción de sus características más fundamentales. Esto permitirá, en apartados posteriores, seguir el desarrollo del trabajo con mayor facilidad.

Se ha decidido organizar la exposición según la naturaleza de las diferentes herramientas y materiales.

3.1 SOFTWARE

Durante el desarrollo del proyecto ha sido necesario emplear diferentes herramientas informáticas para desarrollar las labores de diseño del sistema global que permite el accionamiento del robot que se desea construir. Es por ello por lo que se pretende recoger a continuación cada una de dichas herramientas, y exponer cuáles son los motivos de su empleo, y las tareas que se ha conseguido desarrollar con ellas.

- Siemens NX: herramienta de CAD que implementa algoritmos de resolución de elementos finitos. Esto permite simular el comportamiento del robot, y reducir de este modo el número de ensayos necesarios para conseguir un diseño funcional. Es una herramienta básica en cualquier diseño mecánico, ya que permite saber de antemano el comportamiento (dentro de unos límites), de la pieza diseñada, a la vez que da la posibilidad de anticipar posibles errores de funcionamiento y corregirlos.
A parte de contribuir al diseño, el software Siemens NX es empleado para generar un modelo del material empleado. Para el robot que se pretende construir se emplea una silicona para moldeo, de la cuál es necesario conocer ciertos parámetros físicos. Sin embargo, las bibliotecas del software carecen de materiales de estas características, de modo que será necesario llevar a cabo una serie de ensayos físicos de caracterización del material para determinar sus propiedades, y verificar con posterioridad en el software que su comportamiento, a través del modelo obtenido, se corresponde con el real.
- Solid Edge: herramienta de CAD y representación gráfica, se emplea durante el diseño de los moldes necesarios para la fabricación del robot. Permite generar no solo el diseño 3D que posteriormente se pasa a una impresora adecuada, sino que además permite obtener los planos de dichos archivos tridimensionales y efectuar su representación gráfica.
- VoxCAD: simulador de entornos físicos en tiempo real. Permite el ensayo de las secuencias de marcha del robot empleando para ello un modelo aproximado y discretizado del mismo. El software en cuestión permite generar deformaciones volumétricas de los voxels (células unidad) que integran los modelos. Se puede recrear el inflado de las diferentes partes del robot, y comprobar el efecto de las mismas en un entorno de fricción, que el software es capaz de simular, comprobando la efectividad o no de las distintas secuencias de marcha. Del mismo modo, puede diseñarse un entorno de trabajo formado por diferentes obstáculos, y observar la interacción del robot con

3. HERRAMIENTAS Y MATERIALES

ellos, así como deformar o introducir perturbaciones sobre la secuencia de marcha en tiempo real, y observar el resultado de las mismas. El robot puede ser forzado a moverse optimizando su locomoción en función de diferentes premisas, tales como situaciones que conduzcan a los estados energéticos más eficientes, o el equilibrio global de la estructura.

- Matlab: herramienta de cálculo y programación matemática, se emplea como interfase entre el sistema de control y el usuario final, a través de un código y entornos gráficos adecuados, permitiendo la selección del modo de funcionamiento y sus parámetros con facilidad. Además, en él se elabora la lógica de control detrás de cada modo de funcionamiento, empleando para ello el lenguaje de programación Arduino (correspondiente al microcontrolador usado en el montaje final). Incluyendo las librerías adecuadas, Matlab es capaz de reproducir órdenes y comandos en dicho lenguaje, y comunicarse así en tiempo real con el controlador. Dicha comunicación se lleva a cabo a través de una interfaz gráfica diseñada para tal efecto con el editor de entornos gráficos de Matlab.
- Arduino: Como se ha mencionado, el código de programación Arduino mueve el microprocesador empleado en el control del robot, y permite la interfase entre el código en Matlab, y el sistema físico de control, formado como se verá por un circuito electrónico y neumático.

3.2 MATERIALES

Una vez llevado a cabo el proceso de diseño, es necesario fabricar los entregables del proyecto, para lo cual se necesitan ciertos materiales.

A) Silicona

Se pretende a continuación hacer una recopilación de los materiales de construcción empleados para la elaboración del robot como cuerpo actuador. A este respecto, el material por excelencia empleado en el desarrollo del proyecto es la silicona de catalización alumínica Ecoflex® 0030, obtenida por mezcla a partes iguales de distintos tipos de uretanos.

Se decide emplear este tipo de material, silicona blanda, por varios motivos, recogidos a continuación:

- Alta capacidad de deformación, siendo capaz de soportar elongaciones de hasta 9 veces su longitud original, sin perder sus propiedades elásticas.
- Poca densidad y viscosidad, lo cual la hace fácil de manejar y moldear, obteniendo la mezcla final empleando instrumental barato y sencillo de emplear.
- Ausencia de contraindicaciones médicas, siendo un producto seguro de emplear en contacto con la piel, y certificado por un laboratorio independiente según las recomendaciones de la ISO 10993-10.
- Facilidad y rapidez de curado.

Aun así, es recomendable seguir ciertas precauciones y medidas de seguridad operando este tipo de materiales. Se recomienda el empleo en una sala con ventilación adecuada, y el uso de guantes para evitar la contaminación de otros materiales o incluso alimentos horas después

3. HERRAMIENTAS Y MATERIALES

de la aplicación de la silicona, siendo tóxica su ingesta. Igualmente se aconseja el uso de gafas protectoras.

El uso de este tipo de material puede realizarse a temperatura ambiente, sin necesidad de llevar a cabo un control preciso de la misma. De todos modos, ha de tenerse en cuenta dicha temperatura de empleo y curado, ya que temperaturas por encima de 25°C reducen de forma significativa el tiempo de trabajo de la silicona, así como el tiempo de curado.



Figura 3-22:Silicona de catalización aluminica Smooth-ON® Ecoflex 00-30

Con respecto al curado, este tipo de material puede endurecer en moldes de materiales muy diversos, tales como látex, otras siliconas, madera, y diferentes tipos de plásticos termoplásticos.

En el caso particular del trabajo, y como será expuesto con posterioridad, se emplean moldes de ABS, con curado a temperatura ambiente, aunque se han llevado cabo a pruebas con un horno a 80°C de forma satisfactoria.

B) Impresión 3D

El otro gran material de empleo para la construcción del robot, es el plástico a partir del cual se obtienen los moldes sobre los que se vierte la silicona, impresos en 3D.

En el caso concreto del proyecto a desarrollar, se emplea ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) de 3 mm, caracterizado por ser un termoplástico amorfo, y muy resistente al impacto.

3. HERRAMIENTAS Y MATERIALES

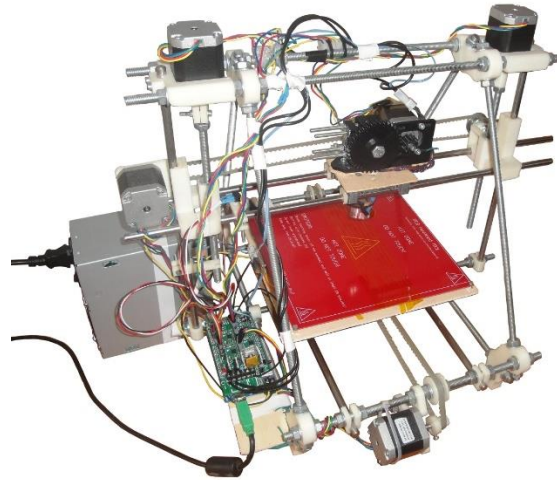


Figura 3-23: Impresora 3D Prusa 2, empleada para la impresión de los moldes.

El empleo de ABS para este proyecto viene condicionado por el stock disponible en los laboratorios de ensayo. A dicho respecto, puede comentarse que el ABS produce piezas de una calidad y resistencia por encima de lo necesario para los moldes que se construyen.

El modelo de impresora empleado es Prusa 2.

C) Herramientas

Durante el proceso de construcción es necesario emplear herramientas de bricolaje y utillajes, que permiten fabricar los diferentes entregables finales del proyecto: la instalación de accionamiento, el propio robot, y los circuitos de potencia.

Para ello, se emplean herramientas tales como taladros, sierras eléctricas, cinta adhesiva, pernos, roscas o tornillos.

3.3 HARDWARE

Por último, se comentan los dispositivos construidos y empleados en el trabajo. Se intentan recopilar los productos/resultados finales que se utilizan a la hora de llevar a cabo los experimentos, sin pormenorizar cada tipo de herramienta empleada en la construcción de cada uno de ellos.

Podemos dividir esta sección en el análisis de 4 aspectos: el microprocesador Arduino, la instalación neumática, la placa de montaje, y el aparataje de ensayos de propiedades mecánicas.

A) Instalación electrónica

La instalación electrónica dota de potencia al circuito de accionamiento, siendo sus integrantes los siguientes componentes:

- Fuente de tensión 12 V 8.5 A (100 W): punto de conexión entre la red eléctrica doméstica y el circuito del robot. Su función es la de transformar la potencia alterna nominal de la red, en potencia continua con las características citadas en la descripción. La fuente se conecta al módulo de relés, suministrando así de corriente eléctrica a la salida de los mismos, y por ende, al accionamiento de las electroválvulas neumáticas. Pese a que dichas electroválvulas trabajan a 12 V nominales, que pueden llegar a

3. HERRAMIENTAS Y MATERIALES

obtenerse con el microprocesador, éste no tiene la potencia suficiente (amperaje deficiente) para mover todas las válvulas simultáneamente. Éste es el motivo fundamental del empleo de la fuente.

- Microprocesador Arduino Mega: Se trata de una placa de microcontrolador con 54 puertos de entrada salida, de los cuales algunos pueden ser usados como salidas PWM, y otros como entradas analógicas. Para su funcionamiento ha de alimentarse con una tensión de referencia en el rango que va de 5 a 12 V, aunque dicho voltaje puede elevarse hasta los 20 en caso de necesidad. Para el montaje de este trabajo, la alimentación se toma desde el PC que gobierna el control de la instalación, siendo por tanto su tensión nominal de 5 V.

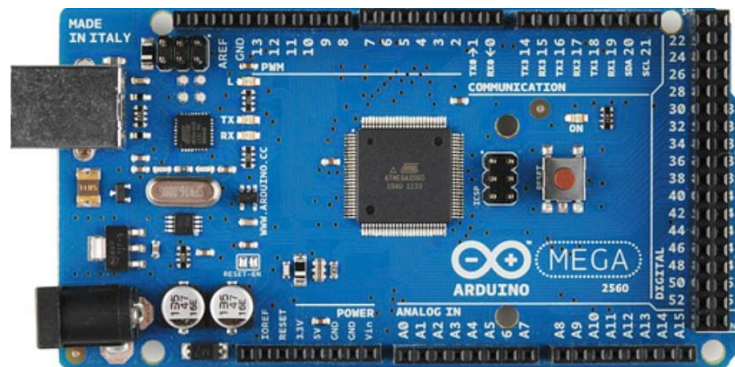


Figura 3-24: Arduino Mega 2560 R3, usado como microcontrolador.

En el proyecto a desarrollar, su empleo se centra en la interfaz física entre el código de control elaborado y puesto en ejecución en el PC a través de Matlab, y la instalación electro-neumática que acciona el robot. Dicho de otro modo, transforma los comandos de código correspondientes al input en la GUI de Matlab, en señales eléctricas de accionamiento y cierre de válvulas en el circuito de ejecución neumática. La placa de microprocesador se monta, junto con la instalación neumática, en la placa base diseñada para tal efecto.

- Módulo de relés: la interfaz entre los puertos de salida del microcontrolador, y las electroválvulas, se realiza a través de un módulo de relés. Sus señales de mando las gobierna del procesador, y son de carácter binario entre 0 y 5 V. La potencia de salida para el accionamiento de las válvulas, como se ha dicho, se obtiene de la fuente de tensión (12 V, 8.5 A).

3. HERRAMIENTAS Y MATERIALES

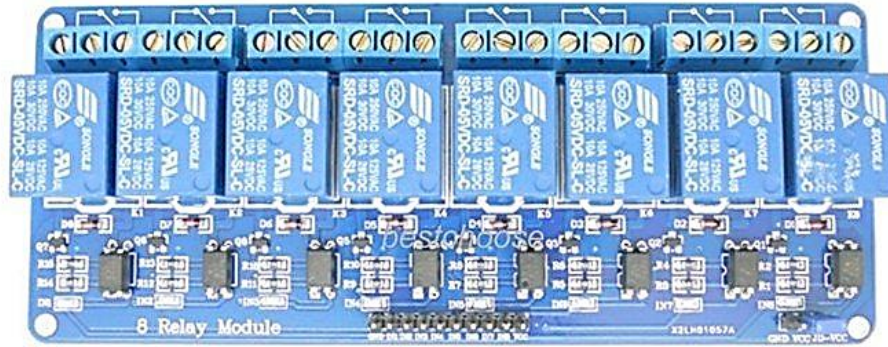


Figura 3-25: Módulo de 8 relés para accionamiento a través de Arduino

B) Instalación neumática

La instalación neumática se encarga de la actuación sobre el cuerpo del robot, aportando el caudal necesario y en las condiciones oportunas para su funcionamiento. El instrumental empleado consiste, fundamentalmente, de 5 grupos de elementos, tal y como se muestra en el esquema.

Se distingue entre:

- Toma de presión: conexión del circuito propio del robot con el exterior. En función de las condiciones de puesta en marcha del dispositivo, pueden emplearse distintos tipos de compresores o generadores de presión para hacerlo funcionar, siempre que permitan unas ciertas condiciones de operación. Por lo general, es necesario disponer de más de 4 bares en la toma de presión para garantizar la potencia neumática suficiente en el circuito, pese a que dicho valor inicial se modulará con posterioridad para adecuarlo a las premisas de control impuestas por la lógica de regulación.

3. HERRAMIENTAS Y MATERIALES

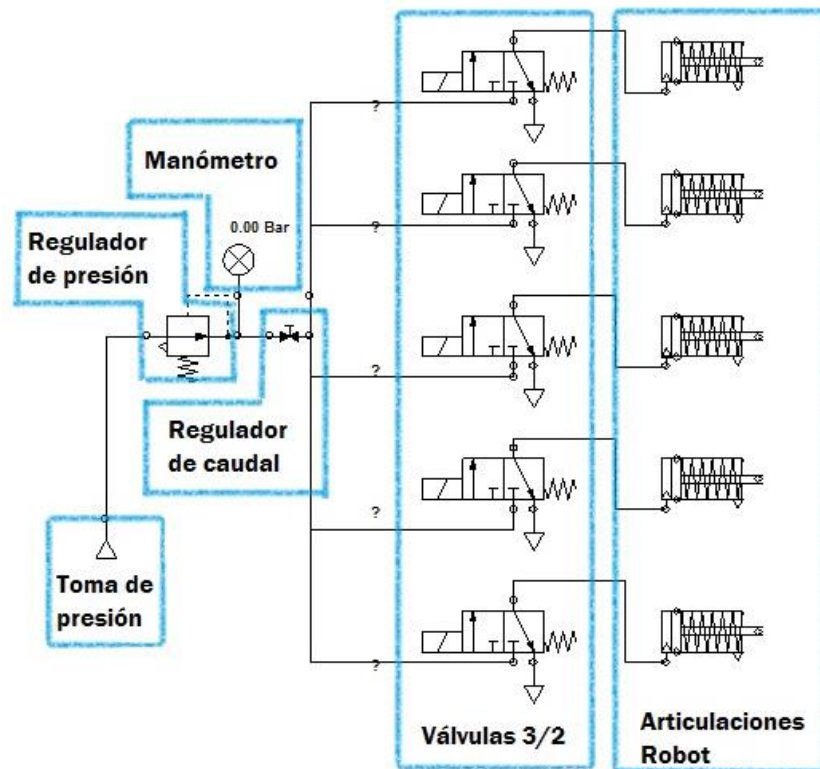


Figura 3-26: Esquema de la instalación neumática empleada para el accionamiento del robot.

- Regulador de presión: permite ajustar el valor de presión de referencia dado por la toma externa al circuito, y establecerlo en base a los cálculos del código. Dispone de un manómetro, y el ajuste de presión se realiza de forma manual, con auto-enclavamiento del sistema de regulación.
- Regulador de caudal: permite ajustar el caudal de referencia tras la salida del regulador de presión, modificando el comportamiento del sistema para un cierto ciclo de control. Es igualmente manual y puede autoenclavarse.

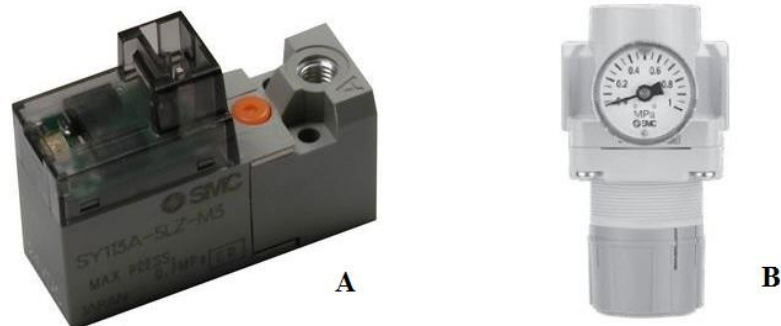


Figura 3-27: Electroválvula (A) y regulador de presión con manómetro incorporado (B), elementos del circuito neumático construido.

- Electroválvulas 3/2 con retorno mecánico: paquete de 5 válvulas de accionamiento por señal eléctrica de 12 V, proporcionada por el sistema Arduino® en respuesta al algoritmo de control. El montaje de las mismas se realiza sobre una placa base de conductos distribuidores y alimentación común, reduciendo así la necesidad de

3. HERRAMIENTAS Y MATERIALES

alimentar cada válvula de forma independiente, ahorrando espacio, facilitando su montaje sobre la placa base, disminuyendo el número de elementos del circuito necesarios, y reduciendo las pérdidas globales del sistema neumático.

- Articulaciones del robot: entendidas como parte del sistema neumático, cada vejiga hinchable del robot puede modelarse como un actuador de retorno mecánico por muelle. Esto se debe a las propiedades elásticas de la silicona empleada, que conduce a que las distintas partes del robot vuelvan a su estado original una vez ha cesado el input de aire a presión en las mismas. Como se expone en el diseño del robot, el prototipo final tiene un total de 5 cámaras deformables o vejigas, que permiten controlar por separado diferentes partes del robot, y conseguir, gracias a la lógica de control, la locomoción del conjunto. Para ello, ha de combinarse de manera adecuada el inflado y vaciado de las distintas vejigas, consiguiendo deformaciones con cierto grado de complejidad.

C) Placa montaje

Tanto circuito electrónico de control y potencia, como el sistema neumático que se ha expuesto, se instalan sobre una placa base. El objetivo de disponer los diferentes elementos de la instalación sobre dicha base común son claros: se pretende conseguir un conjunto donde se integren todos los dispositivos necesarios para operar el robot, que sea fácil de transportar, y permita mantener un orden y organización adecuados a la hora de trabajar.

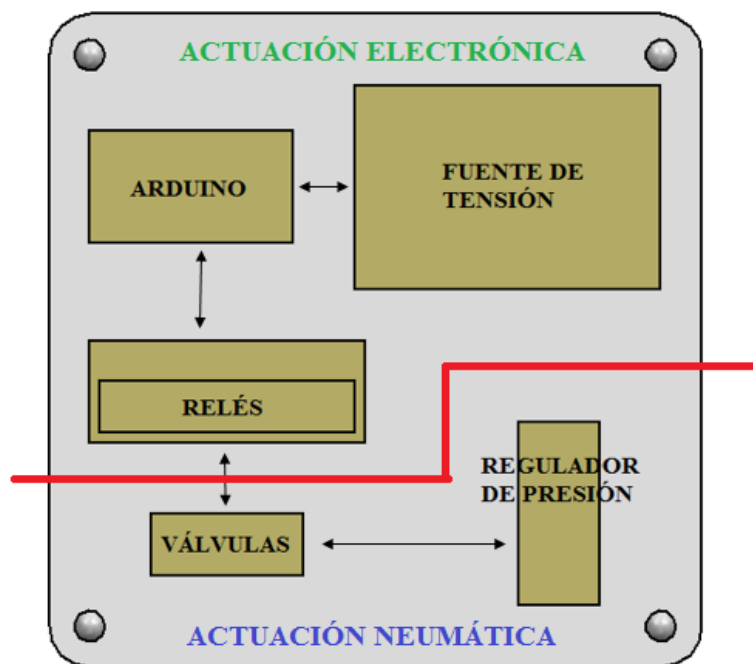


Figura 3-28: Esquema de la estación base sobre la que se montan los circuitos de potencia electrónica y neumática, construida en madera y metacrilato.

Se citan, como elementos principales de la instalación, los siguientes:

- Fuente de tensión.
- Microcontrolador Arduino.
- Conjunto de relés

3. HERRAMIENTAS Y MATERIALES

- Regulador de presión.
- Válvulas neumáticas.

Como se observa en el esquema adjunto, se organizan los diferentes elementos en grupos de componentes, distinguiendo claramente la parte neumática de actuación, y la zona dedicada a la electrónica de control.

La placa está construida en metacrilato y madera, lo cual le da una rigidez adecuada, y un peso liviano para su transporte. El resultado final de la misma se identifica en la siguiente imagen.

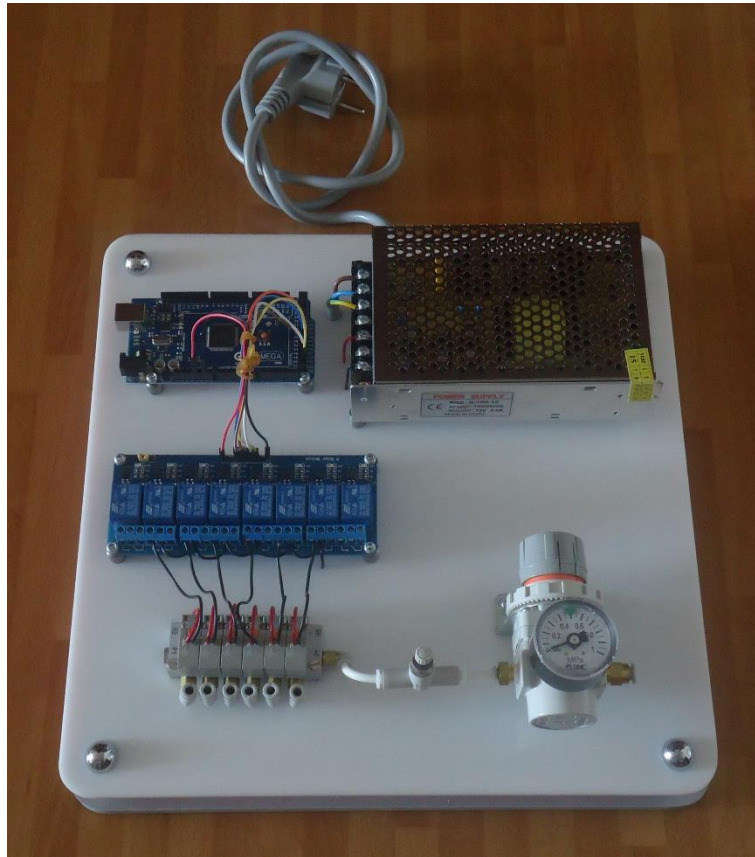


Figura 3-29: Placa de montaje.

Nótese que la placa montada dispone de más elementos de los necesarios para la operación del robot (exceso de relés, válvulas, etc.). La razón para esto es la intención de diseñar y fabricar una placa versátil, que permita operar diferentes tipos de robots en una misma instalación, siendo sencillo el cambio entre uno y otro modelo de robot.

D) Material de ensayos

De cara a la caracterización del material, y como se ha explicado anteriormente, se llevan a cabo una serie de ensayos que permiten definir sus propiedades físicas y mecánicas. Esto permite conocer en profundidad la substancia, al tiempo que permite llevar a cabo una simulación más completa de sus propiedades físicas.

Si bien los ensayos conducidos (tracción, compresión) son sencillos, se precisa de un cierto material y utillaje para llevarlos a cabo de forma correcta.

3. HERRAMIENTAS Y MATERIALES

De este modo, se han empleado diferentes herramientas para la realización de dichas pruebas, que se recogen en la siguiente lista:

- Estructuras soporte (vertical).
- Placas de apoyo.
- Utillaje de fijación y aplicación de cargas.
- Escala métrica.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

Se pretende abordar, a continuación, las diferentes fases que conducen al diseño final del *soft robot*. Para ello, se recopila en cada etapa una serie de ensayos, pruebas e iteraciones de diseño que conducen a dicho resultado final.

En primer lugar, ha de definirse cuales son los objetivos a lograr tras esta fase del proyecto, para poder evaluar al final de la misma su consecución o no. De este modo, se pretende:

- Diseñar un *soft robot* de tipo FEA (Fluid Elastomer Actuator) cuadrúpedo.
- Dotar al robot de los mecanismos necesarios para su deformación con cierto grado de precisión y regulación.
- Verificación del diseño a través de diferentes simulaciones por ordenador, complementadas con ensayos físicos que soporten los cálculos teóricos aportados por las diferentes herramientas de software empleadas.
- Recopilar posibles variaciones o mejoras a posteriori de los resultados obtenidos.

4.1 BRAZO ÚNICO

La fuente de inspiración del trabajo a desarrollar se encuentra en el trabajo desarrollado en la universidad de Harvard [11], en el cual se consigue la locomoción de un *soft robot* cuadrúpedo, con 5 vejigas inflables y de control independiente.

Para conseguir el movimiento del robot, cada miembro es capaz de doblarse al inflar con aire a presión la cavidad interior de la que dispone. Es el principio básico de operación del sistema, y el punto de partida del desarrollo de nuestro robot.

La primera etapa que es necesario abordar, por tanto, es el diseño de un único brazo de tipo FEA. El estudio de un solo miembro del robot por separado permite el análisis detallado de la influencia que tienen en su comportamiento las distintas variables de diseño y operación. Asumiendo hipótesis de partida como son el empleo de un único tipo de material de construcción, las variables de mayor influencia sobre el resultado final son la geometría (variable de complejo análisis) y el volumen de aire contenido en la cámara del brazo, y que provoca su deformación (variable de análisis más sencillo).

Para llevar a cabo el estudio citado, se recurre al empleo del software Siemens NX 8.5, que aúna el diseño CAD con la resolución de ecuaciones mecánicas por elementos finitos. Para poder llevar a cabo las simulaciones del comportamiento del robot, es necesario proporcionar a la aplicación las características físicas del material a emplear, de modo que las ecuaciones a resolver tengan como información de partida datos como el módulo elástico de la silicona empleada, o su densidad.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

4.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Ya que la librería original del programa carece de un material que se aproxime al empleado en el proyecto, es necesario diseñar una serie de experimentos de resistencia de los cuales podamos extraer sus parámetros más significativos.

En concreto, se llevan a cabo pruebas de resistencia sobre diferentes probetas construidas con la silicona de trabajo.

ENSAYO DE TRACCIÓN

Para llevar a cabo las pruebas necesarias se dispone de la siguiente instalación:

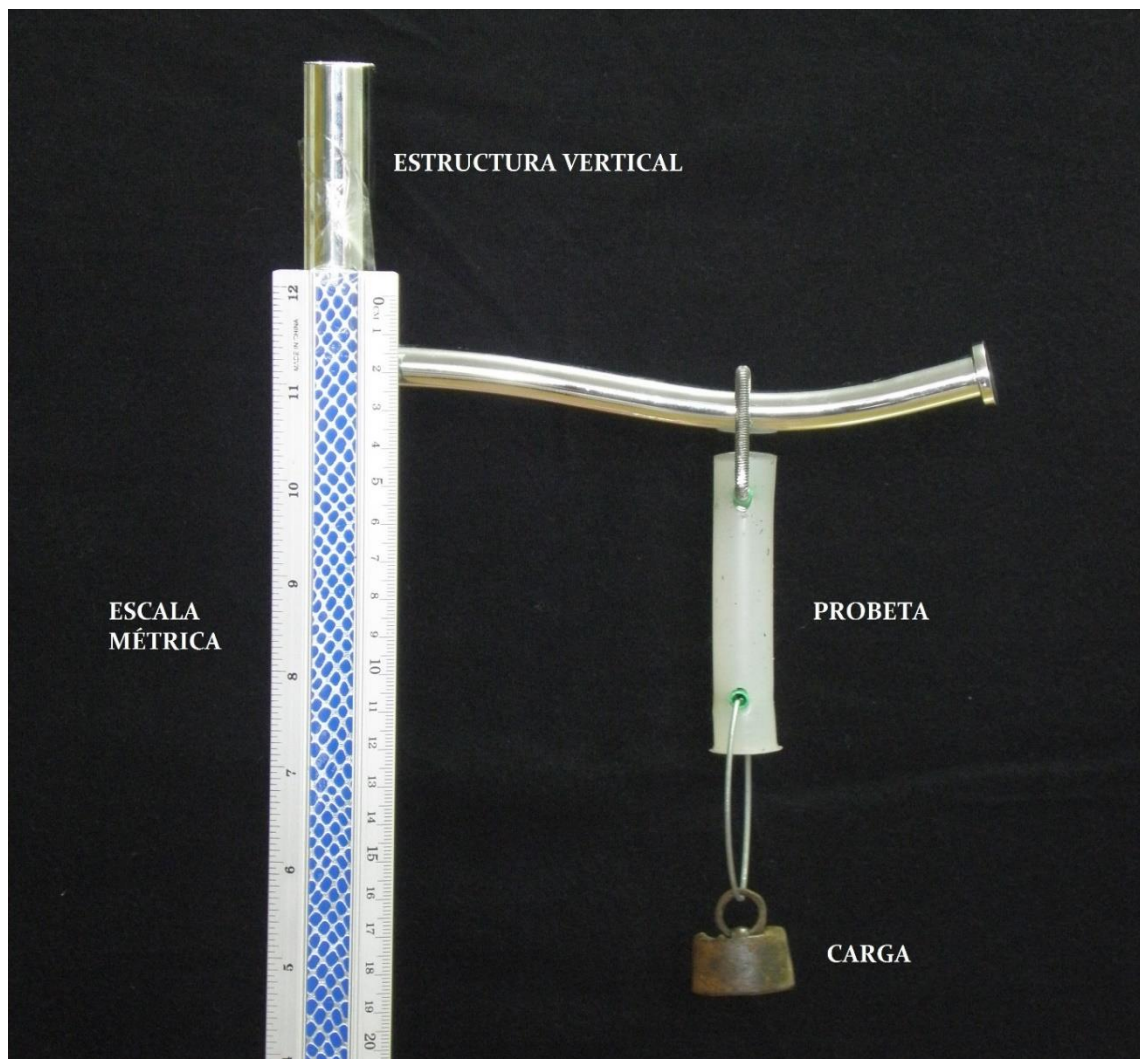


Figura 4-30: Montaje para el ensayo de tracción de la silicona de construcción.

En ella se identifican:

- Una estructura vertical de soporte
- Una escala métrica
- Soportes para la sujeción y carga del material a ensayar.
- Probeta de silicona a ensayar (tipo muelle).
- Diferentes cargas.

La probeta del ensayo tiene las siguientes propiedades:

4. DISEÑO Y DESARROLLO

- Diámetro $\phi 16$ mm.
- Longitud entre puntos de medida 51 mm.

Las pruebas llevadas a cabo consisten en cargar, de forma progresiva, la probeta de silicona con cargas crecientes, y comprobar la deformación experimentada por la misma. Los datos se recogen en la siguiente tabla.

| Ensayo | Carga (kg) | Longitud (m) | Δ Longitud | Deformación unitaria, ε | Módulo elástico (E) |
|--------|------------|--------------|-------------------|-------------------------------------|---------------------|
| 0 | 0 | 0,051 | 0 | 0 | - |
| 1 | 0,05 | 0,055 | 0,004 | 0,078 | 31 kPa |
| 2 | 0,2 | 0,064 | 0,013 | 0,255 | 38 kPa |
| 3 | 0,5 | 0,091 | 0,041 | 0,804 | 30 kPa |

Tabla 4-2: Resultados del ensayo de tracción

Los resultados recogidos pueden representarse de forma gráfica, obteniendo un diagrama tensión – deformación, característico del ensayo de tracción.

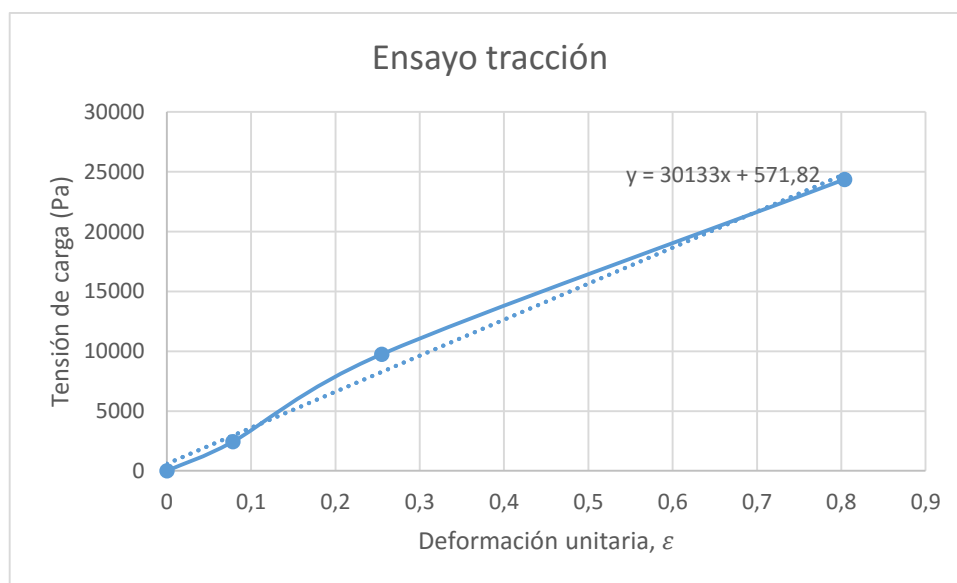


Figura 4-31: Gráfico de resultados del ensayo de tracción.

Analizando el resultado del ensayo, se obtiene un promedio para el módulo elástico de:

- $E = 32$ kPa.

Han de matizarse diferentes detalles sobre el ensayo llevado a cabo. En primer lugar, la construcción de la probeta es relativamente compleja, ya que su diseño ha de integrar el utillaje necesario para su sujeción y para la aplicación de carga. Esto condiciona la validez del ensayo, ya que se puede asegurar que el esfuerzo aplicado no es una distribución uniforme de tracción.

Por otro lado, la zona de conexión con los utillajes no está fijada de forma ideal a la probeta, y esto hace que, al aplicar cargas elevadas, se produzca una separación entre el utillaje y la silicona, reduciendo la sección resistente y alterando así el resultado final.

Es por ello, por lo que se decide contrastar la información obtenida en este ensayo con otro más fácil de aplicar, como puede ser un ensayo de compresión.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

ENSAYO DE COMPRESIÓN

Se dispone de esta una instalación formada por:

- Probeta de silicona.
- Placa de apoyo.
- Placa intermedia.
- Carga.



Figura 4-32: Montaje para el ensayo de tracción de la silicona de construcción.

Las pruebas llevadas a cabo consisten en la aplicación de cargas de compresión transmitidas a través de la placa intermedia para conseguir una distribución lo más uniforme posible sobre la superficie de la probeta, asegurando unas condiciones lo más cercanas posible al ensayo ideal de compresión uniaxial.

Las dimensiones originales del disco ensayado son:

- Diámetro $\phi 51$ mm.
- Longitud 10 mm.

Los datos quedan recogidos en la siguiente tabla:

| Ensayo | Carga (kg) | Longitud (m) | Deformación unitaria en dirección longitudinal, ϵ_x | Radio (m) | Deformación unitaria en dirección radial, ϵ_r |
|--------|------------|--------------|--|-----------|--|
| 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0,026 | 0 |
| 1 | 8 | 0,0055 | -0,447 | 0,031 | 0,168 |

Tabla 4-3: Resultados del ensayo de compresión.

A partir de dichos datos, pueden calcularse las siguientes características del material:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \qquad \nu = \frac{-\epsilon_r}{\epsilon_x}$$

- Módulo elástico, $E = 79$ kPa.
- Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,38$.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

Nótese que el modo de ensayo empleado en esta ocasión presenta varias ventajas en relación al ensayo de tracción:

- Es posible simular de forma adecuada la distribución de carga necesaria.
- Es posible medir la deformación transversal (radial) de la probeta ensayada, permitiendo esto el cálculo del coeficiente de Poisson.

Además, es necesario reseñar que el valor de módulo elástico obtenido es sensiblemente diferente al del ensayo de tracción. Esto tiene su origen en dos posibles causas:

- Comportamiento desigual del material en función del tipo de carga aplicada
- Posibles desviaciones del ensayo real respecto al teórico, que desvirtúan los resultados obtenidos.

Recurriendo a las teorías de elasticidad de Von Mises y Tresca, los materiales dúctiles (clasificación en la cual estaría la silicona empleada) tienen comportamientos similares a tracción y a compresión; no así los materiales no dúctiles como el hormigón.

Descartando de ese modo la posibilidad de atribuir el comportamiento desigual a las características intrínsecas del material, cabe pensar en errores a la hora de ensayar. Efectivamente, como se ha hecho notar anteriormente, el ensayo de tracción llevado a cabo tiene ciertas dificultades constructivas que hacen que los resultados no puedan ser tomados como completamente válidos.

Al igual que en el caso anterior, los resultados del ensayo pueden recogerse en un gráfico tensión – deformación.

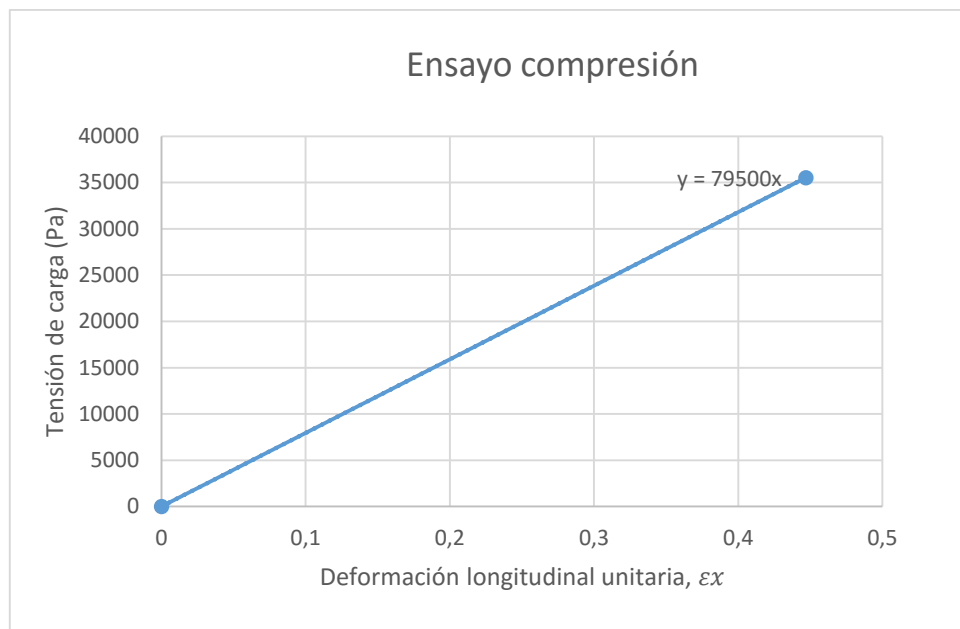


Figura 4-33: Gráfico de resultados del ensayo de compresión.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

CONCLUSIÓN ENSAYOS

Por lo expuesto anteriormente, y tras investigar algo más en profundidad las características de materiales similares al empleado, se decide fijar las características del mismo como:

| | |
|---|------------------------|
| Densidad, ρ (proporcionado por fabricante) | 1328 kg/m ³ |
| Módulo Elástico, E (ensayos) | $79 \cdot 10^3$ Pa |
| Coefficiente de Poisson, ν (ensayos) | 0,4 |

Tabla 4-4: Caracterización del material silicona.

4.1.2 DISEÑO GEOMÉTRICO

Tras conseguir una definición completa del material para poder operar con él, se pretende obtener la geometría más efectiva para el funcionamiento del brazo del cuadrúpedo.

Para ello, diferentes propuestas de ‘brazo’ se analizan con el software de elementos finitos, para conseguir un diseño optimizado, evitando la construcción de un cierto número de prototipos.

El objetivo de locomoción es conseguir que cada uno de los brazos del mismo sea capaz de deformarse ‘arqueándose sobre su propio cuerpo’, reduciendo de ese modo la zona de contacto de la extremidad con el suelo, su fricción, y generando un avance cuando el brazo vuelve a su estado de relax. Este procedimiento de control es explicado posteriormente, pero la secuencia que se persigue se resume en la siguiente figura.



Figura 4-34: Secuencia de avance de la extremidad del cuadrúpedo.

Para ensayar los distintos modelos de brazo propuestos, se fijan unas condiciones comunes de operación:

- Empleo de un brazo prismático de dimensiones exteriores 30x20x100 mm.
- Empleo de una sujeción del brazo empotrada en su extremo izquierdo y libre en el resto de su volumen.
- Presión ejercida por el aire a presión en la cavidad interior de 0.2 MPa.
- Mallado tetraédrico de dimensión característica 10 mm, siendo una resolución de compromiso entre las necesidades de convergencia de la solución, y la rapidez de resolución de los cálculos.
- Resolución de elementos finitos: NASTRAN 106 – *Non Linear Statics Global Constraints*, módulo de resolución de ecuaciones estáticas de tipo no lineal (empleada dada la no linealidad, a priori, del comportamiento del material).

Con estas premisas de partida, se diseñan diferentes estructuras internas que al llenarse de aire a presión han de intentar conseguir:

- La máxima curvatura sobre eje de flexión.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

- La menor deformación volumétrica posible.

Esto es, se ponderan como positivos los resultados con mayor ratio curvatura-deformación total.

De este modo, el proceso de diseño llevado a cabo puede resumirse en las siguientes etapas, que dan una idea de la evolución entre las diferentes alternativas hasta conseguir un diseño que se adapte a los objetivos propuestos.

Los resultados ofrecen una escala de valores que se corresponden a una determinada coloración en función del valor de desplazamiento que experimentan.

ETAPA 1

Se parte del prisma citado, y se realiza en su interior una cavidad prismática de sección cuadrada 10x10 y longitud 90 mm, con salida al extremo empotrado. La simulación se lleva a cabo el material de características:

- Densidad 1328 kg/m³
- Módulo elástico $690 \cdot 10^3$ Pa.
- Módulo de Poisson 0.4.

El ensayo se realiza con presión interna de 2 bares, y sin modelar el efecto de la gravedad sobre el conjunto.

En estas condiciones, se verifica lo siguiente:

- Deformación simétrica del cuerpo, partiendo de un objeto y cargas aplicadas de tipo simétrico.
- El grosor de las diferentes superficies frente a las que se aplica la presión influye en la deformación obtenida (paredes laterales apenas se deforman, frente a las verticales). Es un resultado relevante, ya que se puede jugar de esta forma con la geometría para, sin emplear materiales diferentes, conseguir que diferentes zonas del mismo se comporten de manera distinta frente a la carga.
- El resultado de deformación de las superficies exteriores es resultado de la deformación de la cámara interior. Dicha deformación es, lógicamente, simétrica por las condiciones mencionadas anteriormente.
- En su estado final, el sólido ha aumentado su superficie exterior total, habiéndose extendido en dirección XC, YC y ZC debido a la carga uniformemente distribuida sobre el sólido.

Se recogen a continuación la sección frontal del cuerpo, con sus secciones exterior e interior acotadas de forma adecuada.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

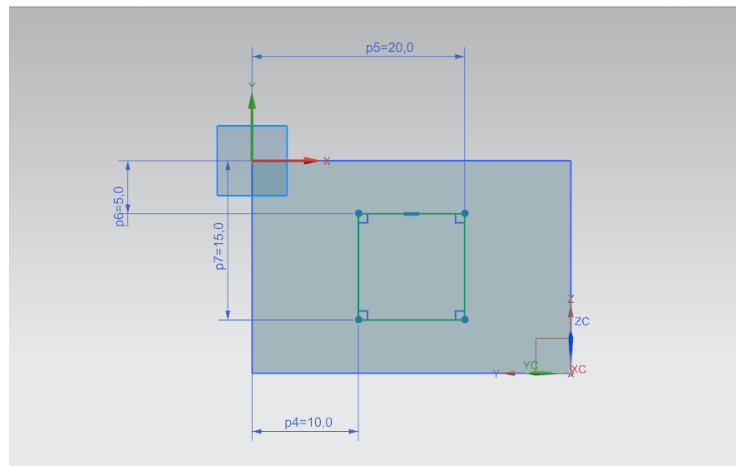


Figura 4-35: Sección ensayada en la etapa 1.

Se muestra igualmente el sólido analizado de forma previa y posterior a la aplicación de la carga de aire a presión.

Se muestra igualmente una sección del cuerpo, para mostrar la deformación de la cámara interior.

El proceso expuesto para el análisis de este primer caso será el seguido en el resto de etapas del proceso de diseño. Es posible que se omitan algunos pasos (geometría acotada, sólido sin deformar, sólido deformado) o se reduzca el detalle, una vez entendido el proceso de diseño que se ha seguido.

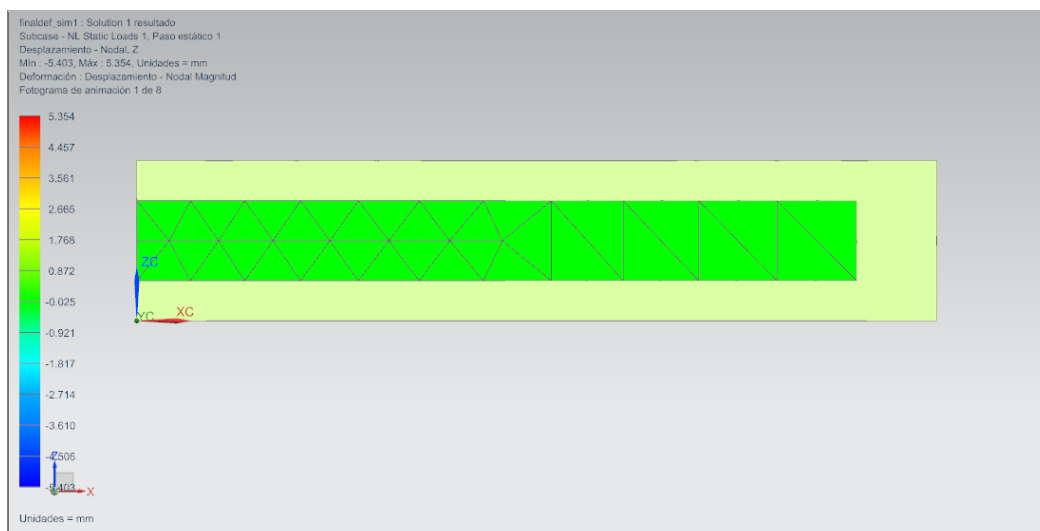


Figura 4-36: Modelo en reposo de la etapa 1.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

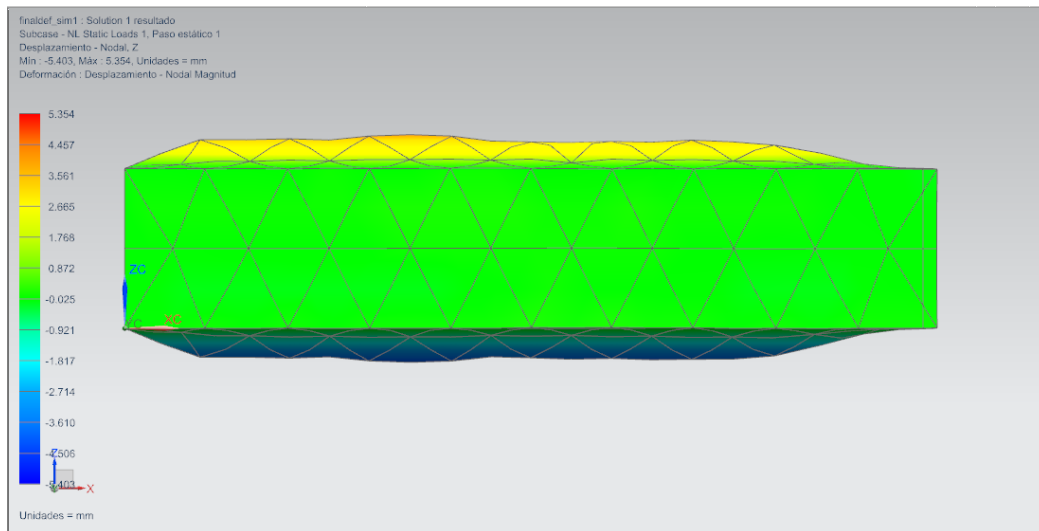


Figura 4-37: Resultado de la simulación de la etapa 1.

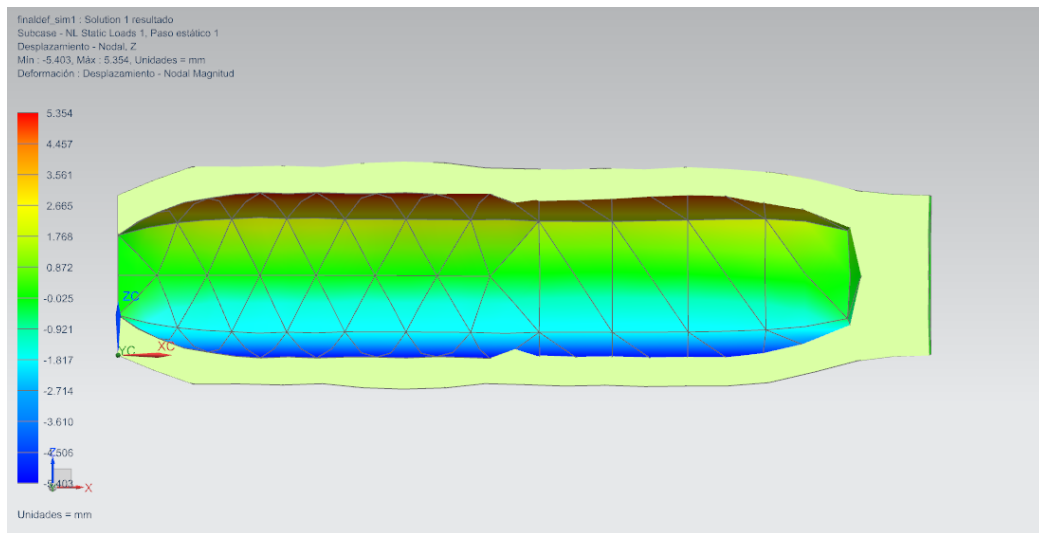


Figura 4-38: Resultado de la simulación de la etapa 1.

ETAPA 2

Partiendo de la misma geometría exterior, el mismo material y la misma presión de aire (condiciones previas al proceso de diseño), se procede a analizar una cavidad semejante a la anterior, pero de sección circular. Esto es, se practica una cavidad de tipo cilíndrico con el mismo volumen que el prisma anterior, y se comprueba la diferencia entre uno y otro caso. Para lograr el mismo volumen interior, la circunferencia generatriz del cilindro debe de tener un diámetro aproximado de 11,3 mm.

Se verifica, en este caso que:

- La geometría interior de tipo cilíndrico es menos efectiva que la de tipo prismática. Esto se debe a que la sección circular, frente a una carga de tipo presión uniforme es muy efectiva absorbiendo cargas por esfuerzo axial, minimizando así la deformación que sufre la cámara.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

- Por lo expuesto, se descarta el empleo de geometría de tipo circular para los conductos interiores del robot, y se procede a fases posteriores de diseño empleando siempre geometría de tipo prismática.

Se adjunta la imagen de tipo cilíndrico (deformación en las cotas superiores de hasta 4,2 mm), menor en relación a la obtenida con la geometría de la etapa 1 (deformación superior de más de 5 mm).

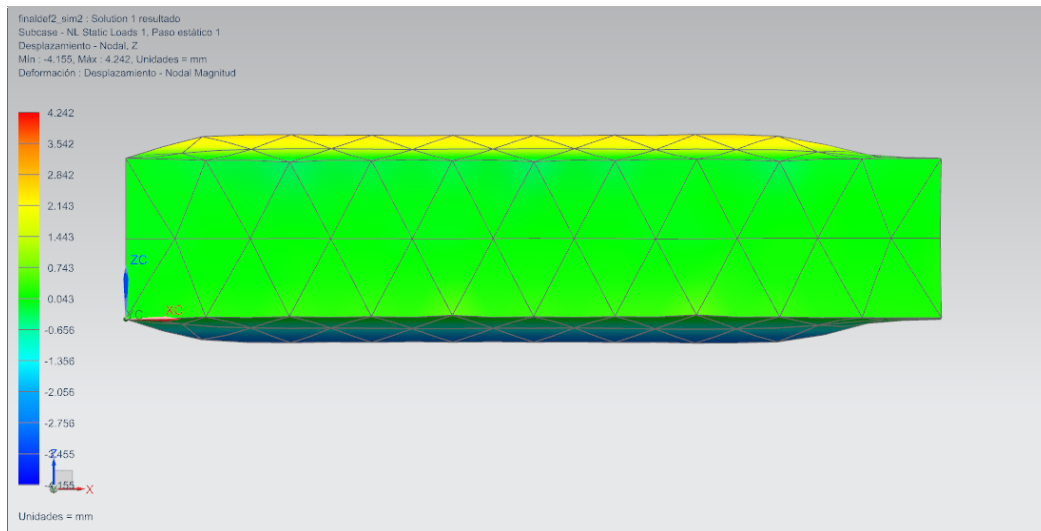


Figura 4-39: Resultado de la simulación de la etapa 2.

ETAPA 3.

En esta ocasión, el orificio interior se construye a partir del de la etapa 1, pero su sección se ve reducida a la mitad, y deja de estar centrado en el sólido, para pasar a desplazarse hacia arriba. Esto provoca una situación en la que la pared superior del brazo es de menor espesor que la pared inferior, consiguiéndose así el primer paso hacia el doblado de la extremidad, al deformarse de manera diferente su parte de arriba y de abajo.

Repetiendo las condiciones citadas anteriormente de presión, apoyos, material, así como de ausencia de gravedad (especialmente relevante para entender el efecto de la deformación conseguida), se observa:

- Curvatura del brazo, al desplazarse hacia cotas negativas su extremo libre (derecho), manteniéndose fijo el extremo izquierdo. Efecto posible gracias a la diferencia de espesores explicada.

Se muestra en la primera imagen el sólido sin deformar (en gris), superpuesto con el sólido deformado (coloreado), pudiéndose observar el efecto citado.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

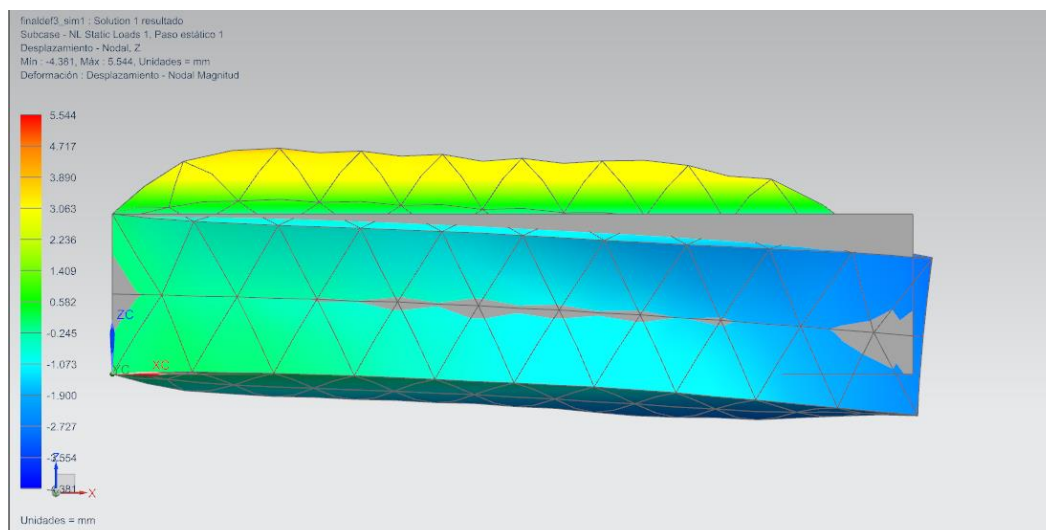


Figura 4-40: Resultado de la simulación de la etapa 3.

Al estudiar una sección de la deformada se observa la ‘excentricidad’ de la cámara hinchable, desplazada hacia la parte superior del sólido.

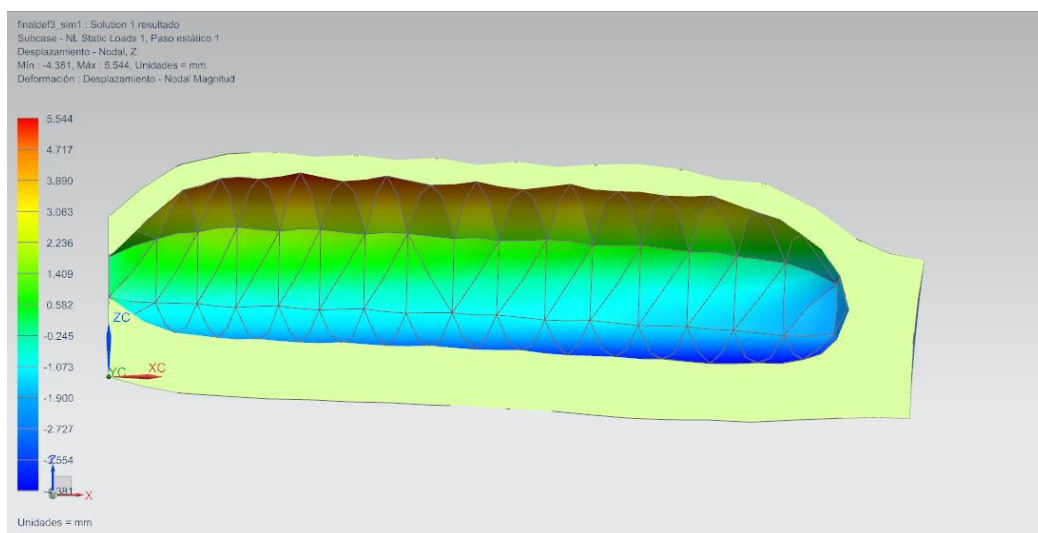


Figura 4-41: Resultado de la simulación de la etapa 3.

ETAPA 4

Habiendo comprobado el efecto de la diferencia de espesores entre la capa superior e inferior, se pretende hacer un agujero más grande, para conseguir mayor deformación (a mayor superficie sobre la que cargar presión interior, mayor ha de ser la resultante de fuerzas y la curvatura obtenida).

Empleando un agujero de 20x5 mm y 90 mm de profundidad, se lleva a cabo la prueba para verificar dicha hipótesis, obteniendo el resultado mostrado a continuación. De nuevo se mantiene en color gris la forma original del sólido, para permitir la comparativa visual.

El material, los apoyos y la ausencia de gravedad se mantienen vigentes, así como la presión interior a la que se somete a la vejiga, fijada a 2 bares.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

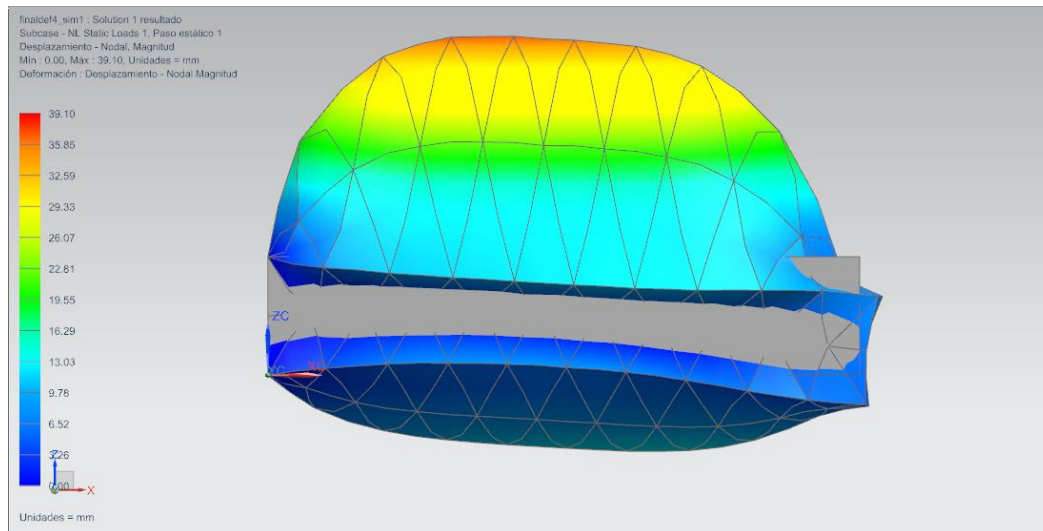


Figura 4-42: Resultado de la simulación de la etapa 4.

Como se puede comprobar, efectivamente la deformación obtenida es de un orden de magnitud mayor que la conseguida en el ensayo previo. Sin embargo, se comprueba el principal problema de emplear una única gran cavidad prismática, a saber:

- Expansión volumétrica de magnitud muy superior a las dimensiones originales, obteniendo así en sólido inflado tipo globo con una ligera inclinación en su extremo libre.

Esto quiere decir que el resultado obtenido tiene un pésimo ratio curvatura-deformación total: el sólido se deforma enormemente para conseguir una mínima curvatura.

Se descarta por tanto el empleo de una única cámara para conseguir la deformación deseada, y se pasa a analizar otras alternativas.

ETAPA 5

Se comprueba la efectividad de incrementar la superficie de actuación a través del empleo de una estructura ramificada. El esquema se muestra en la siguiente figura.

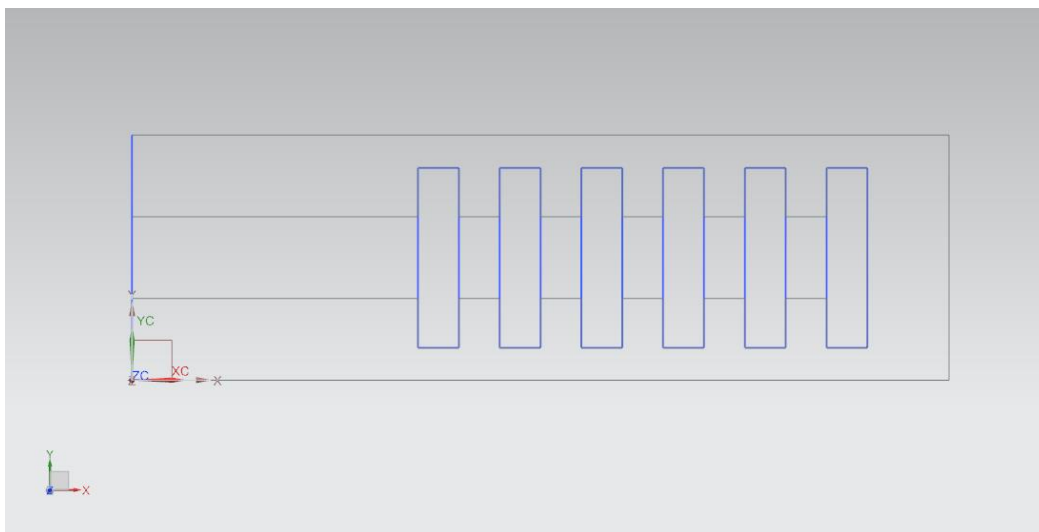


Figura 4-43: Diseño ensayado en la etapa 5.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

La estructura interior de tipo ramificado se basa en un canal principal que recorre el prisma exterior en su dirección longitudinal, del cual salen perpendicularmente otros canales de la misma altura.

De nuevo, los canales son de tipo ‘excéntrico’, es decir, se encuentran desplazados hacia arriba respecto al plano medio del cuerpo. El resultado de la deformación es el siguiente:

- El extremo derecho baja más que en la etapa 3.
- La deformación volumétrica es de menor magnitud que en la etapa 4, y parecida a la etapa 3.

Se consigue mejorar, de esta forma, el ratio curvatura-deformación total. Esto es, se consigue una mayor curvatura sin que la estructura ‘se hinche’.

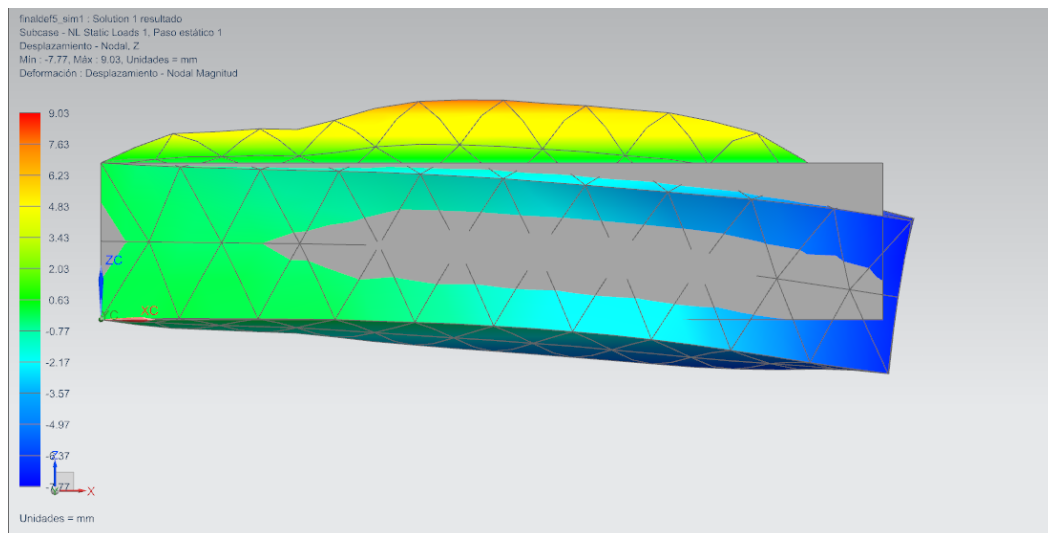


Figura 4-44: Resultado de la simulación de la etapa 5.

Analizando la sección, se observa la distribución de vejigas empleada.

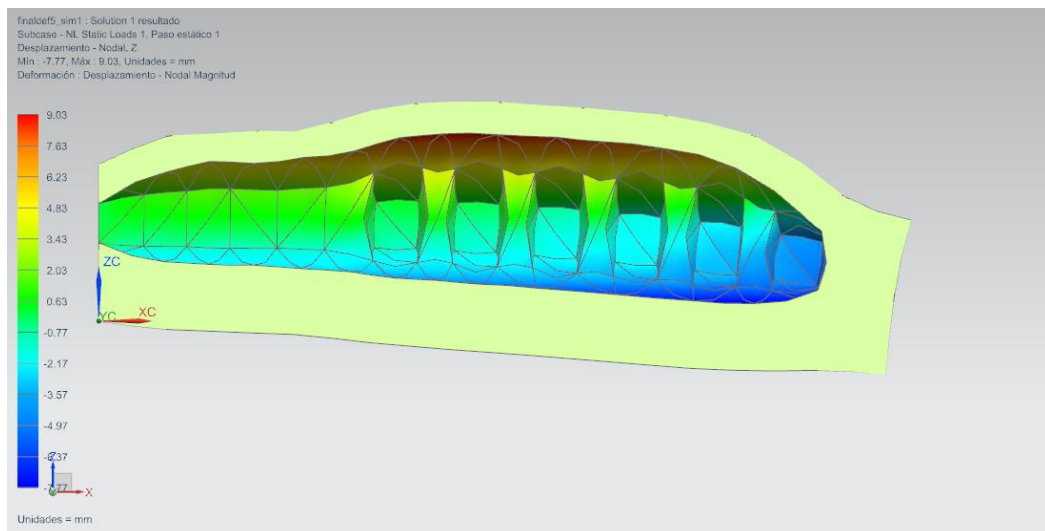


Figura 4-45: Resultado de la simulación de la etapa 5.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

ETAPA 6

Sobre el mismo modelo empleado en la etapa 5, se repite el ensayo con las mismas condiciones, incluyendo el efecto de la gravedad. De este modo, se consigue que:

- El extremo derecho descienda unos 7 mm más, un incremento aproximado del 40% sobre las condiciones del ensayo de la etapa 5.

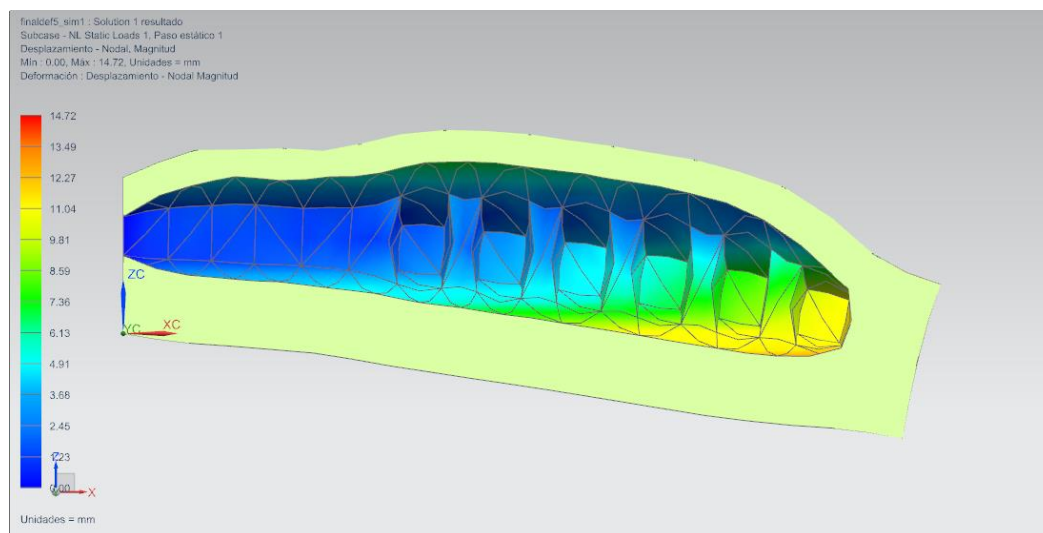


Figura 4-46: Resultado de la simulación de la etapa 6.

ETAPA 7

Sobre la base del ensayo realizado en la etapa 6, se decide aumentar la presión de 2 a 3 bares. Los resultados son:

- Deformación de mayor entidad (el cuerpo crece en volumen).
- Mayor curvatura (descenso del extremo derecho).

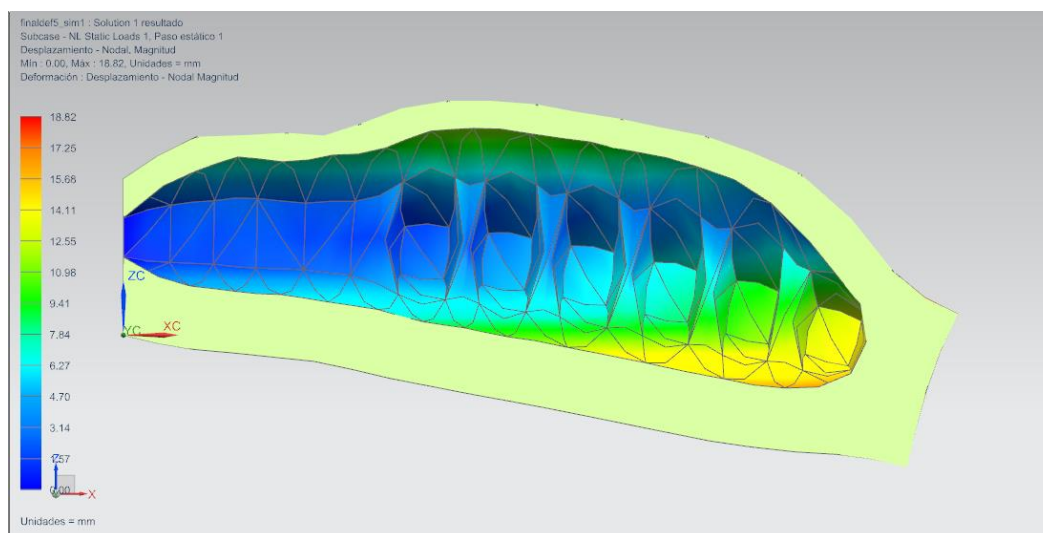


Figura 4-47: Resultado de la simulación de la etapa 7.

Investigando con las variables del ensayo, se comprueba que incrementar la presión por encima de los 3 bares empleados puede resultar problemático, al reducirse el ratio buscado (el cuerpo ‘se hincha’).

4. DISEÑO Y DESARROLLO

ETAPA 8

Última etapa del proceso de diseño. Tras varias modificaciones sobre la base de los ensayos 6 y 7, se consigue un diseño de brazo optimizado.

Repitiendo las condiciones de la etapa 6 (presión de 2 bares, acción de la gravedad y apoyos iniciales), se consigue una gran curvatura empleando la siguiente geometría.

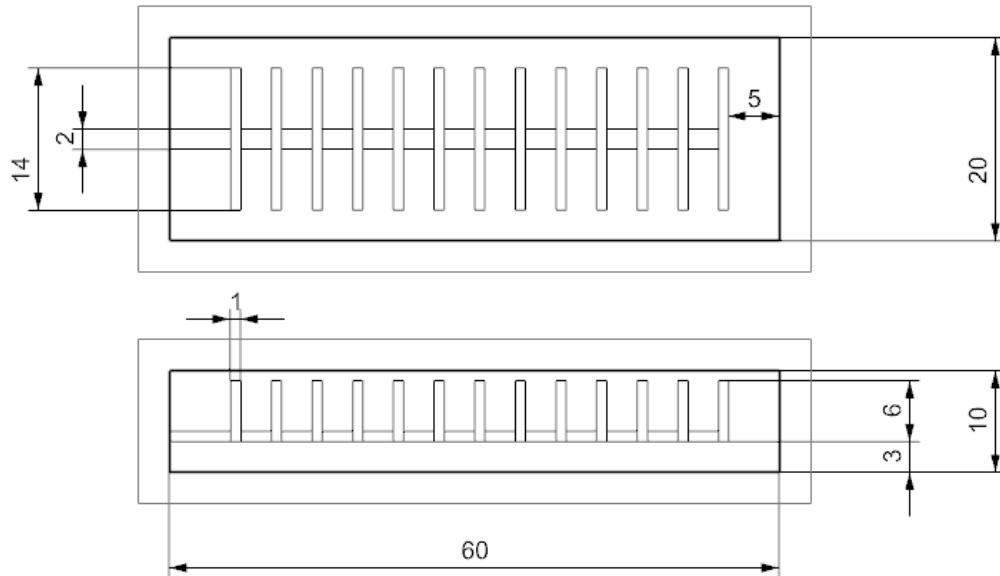


Figura 48: Diseño del modelo ensayado durante la etapa 8.

Se aplica el concepto de la ramificación en dos direcciones diferentes:

- En perpendicular a lo largo del carril central principal.
- En vertical, desde el carril principal hacia la cara superior del prisma exterior.

Empleando la técnica citada se consigue el mejor ratio curvatura-deformación total, tal y como demuestran los resultado de los ensayos.

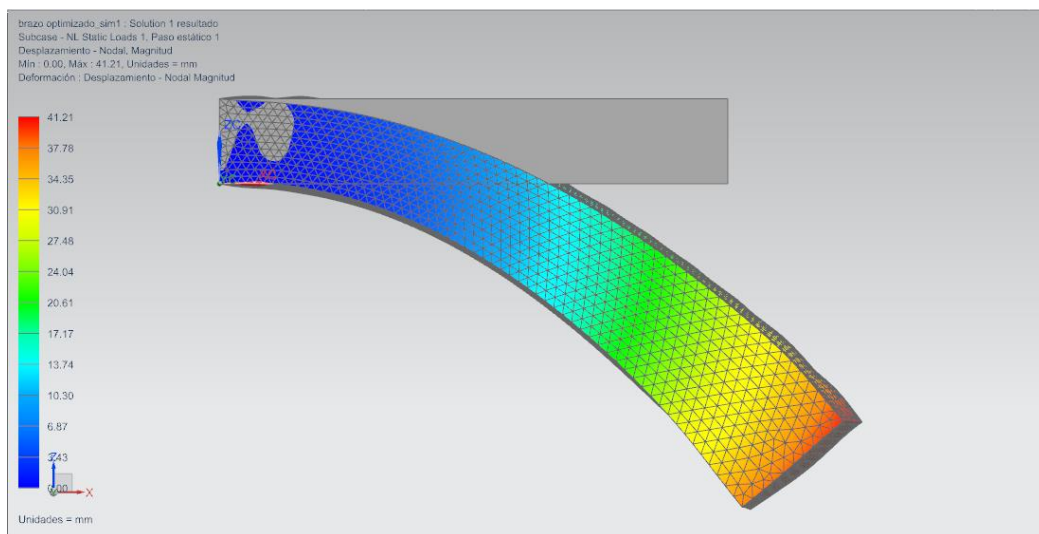


Figura 49: Resultado de la simulación de la etapa 8.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

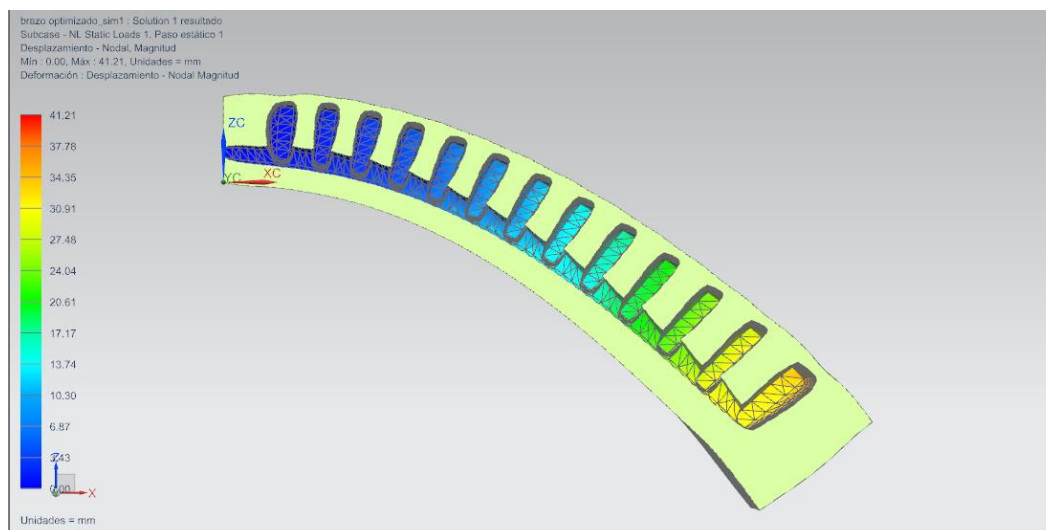


Figura 4-50: Resultado de la simulación de la etapa 8.

4.1.3 INCIDENCIAS Y LIMITACIONES EN LA SIMULACIÓN

Se recoge a continuación una serie de problemas encontrados a la hora de efectuar las simulaciones expuestas.

- A) Limitaciones debidas al integrador de elementos finitos: el algoritmo de resolución empleado, NASTRAN 106, origina diferentes errores que le impiden finalizar la simulación, al no ser capaz de alcanzar una convergencia en las soluciones que calcula. La citada falta de convergencia tiene su origen en los siguientes parámetros de la simulación:
- Tamaño del mallado. La densidad de elementos finitos ha de ser la adecuada, alcanzando un compromiso entre la precisión de la solución (mallado de menor escala, más elementos de cálculo) y la no convergencia de la misma (mallados de gran tamaño). Además, en la elección del mallado adecuado influye la capacidad de cálculo del ordenador utilizado, ya que tamaños de malla muy pequeños pueden ralentizar mucho la resolución.
 - Incompatibilidad de los apoyos. Para obtener una solución convergente, es necesario fijar ciertos movimientos del cuerpo con los pertinentes apoyos. Sin embargo, en caso de haber un exceso o un defecto de los mismos (caso hiperestático e hipostático, respectivamente), es posible que el algoritmo de resolución no alcance una solución, o que la conseguida se encuentre ‘distorsionada’, siendo sencillo determinar su poca utilidad al arrojar tamaños de deformación de escala mucho mayor que la del cuerpo original (relación deformación – tamaño de kilómetros vs milímetros).
 - Definición inapropiada del material. Es posible que el algoritmo sea incapaz de resolver ciertos tipos de materiales. Por ejemplo, aquellos con coeficiente de Poisson mayor de 0,4. Se desconoce el motivo de la imposibilidad de resolver este tipo de materiales, aunque sí que es cierto que en la práctica es difícil encontrarlos.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

- B) Limitaciones debidas a los apoyos que son posibles modelar en el software: ya se ha comentado la influencia que tiene en la convergencia de la solución la incorrecta fijación de los grados de libertad del sólido estudiado. Sin embargo, existe una segunda limitación asociada a los apoyos, y es la escasez de modelos de fijación para el análisis de cuerpos tridimensionales. De hecho, y como se cita anteriormente, los ensayos se realizan con un modelo con un extremo empotrado y el otro libre. El uso de esta hipótesis supone importantes cambios con respecto a la realidad del robot, en la que el extremo que se ha modelado como libre, en realidad se encuentra en contacto con la superficie de avance, lo cual modifica lógicamente la deformación final obtenida. Aun así, la simulación de contactos y colisiones necesita de unos conocimientos en simulación de elementos finitos que se escapan al ámbito de este trabajo, que pretende hacer un análisis sencillo para seleccionar un diseño adecuado.

4.2 ANÁLISIS E INTERACCIÓN CON EL ENTORNO

Otra de las etapas fundamentales del diseño del *soft robot* es aquella que permite estudiar la interacción del mismo con su entorno. Se ha citado anteriormente la importancia que tienen las condiciones de fricción en relación a las posibilidades de movimiento, en relación a la capacidad de deformación que presentan los materiales de construcción.

Esto es, se sabe, a priori, que el funcionamiento de la robótica flexible, en el caso de los actuadores de tipo FEA, se basa en la interacción friccional de la silicona de construcción y el objeto o superficie en contacto con ella (Trivedi et al. 2008) [5].

Para entender dicha interacción, y su efecto, se procede al estudio de diferentes casos empleando para ello el software VoxCAD.

Entre las posibilidades que ofrece dicha aplicación, está la de simular la interacción de los diseños en tiempo real en un entorno físico dinámico, con gravedad, fricción, y grandes deformaciones.

Sin embargo, lo que le aporta interés a la simulación en dicho software es la posibilidad de efectuar deformaciones de tipo volumétrico sobre las geometrías diseñadas, replicando así en cierto modo la actuación llevada a cabo sobre los *soft robots* estudiados.

Antes de exponer el diseño empleado, es necesario entender la forma en la que se simulará el *soft robot*.

VoxCAD permite definir diferentes materiales para la construcción de los dispositivos, y combinarlos en una misma estructura. Entre las propiedades que pueden fijarse para cada material diferente, se encuentran:

- Módulo elástico
- Coeficiente de Poisson
- Densidad
- Coeficiente de dilatación volumétrica en función de la temperatura
- Coeficiente de fricción estático
- Coeficiente de fricción dinámico.

Algunas de estas propiedades ya han sido determinadas en la fase anterior de diseño, a través de los ensayos pertinentes y la información dada por el fabricante.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

Se sabe, además, que la silicona empleada apenas experimenta variaciones de volumen frente a cambios de temperatura. Sin embargo, de cara a la simulación, esta propiedad será empleada para generar las expansiones que experimentan las cámaras de los *soft robots* reales. Esto es, se definirán materiales con diferentes coeficientes de dilatación volumétrica, y se forzarán ciclos de variación de temperatura, consiguiendo así deformaciones que, como se verá, conducen al avance del robot.

4.2.1 AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

Al existir varias variables de control tanto para la definición del material como para la simulación del robot, es necesario efectuar ciertas pruebas que aseguren el funcionamiento del efecto que se persigue, ajustando de forma correcta los parámetros citados.

Se parte, de la siguiente geometría, en la que pueden identificarse, en tres colores diferentes, los siguientes materiales:

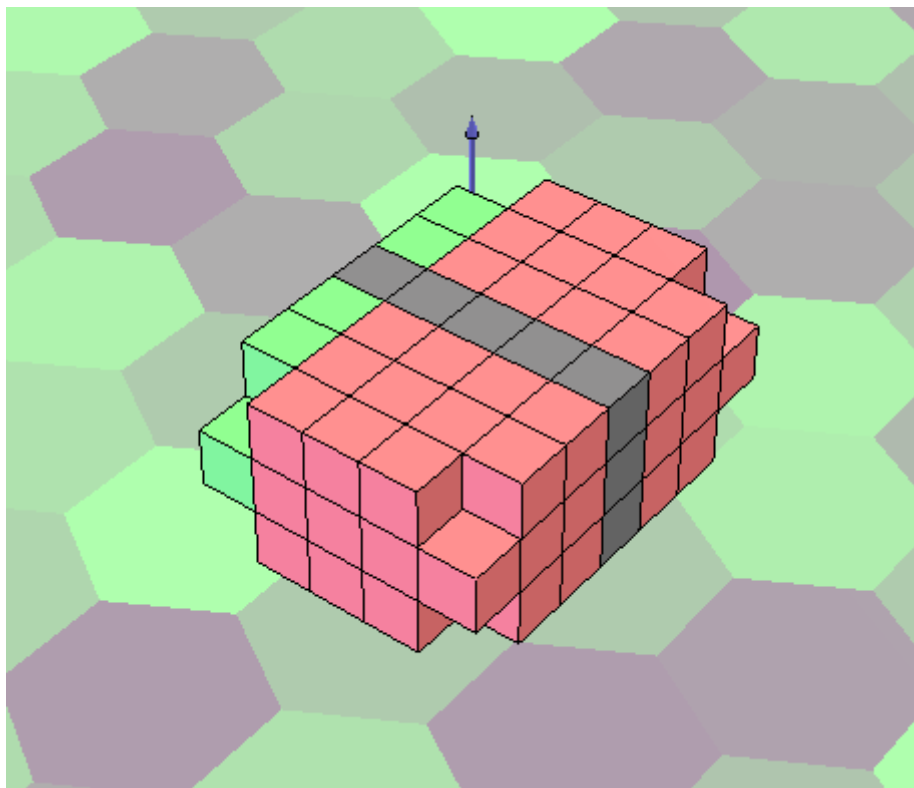


Figura 4-51: Diseño ensayado en VoxCAD para el ajuste de los parámetros de la simulación.

- Gris: material rígido (en comparación con los demás empleados) y sin variación de volumen frente a la temperatura. Sus condiciones de fricción son:
 - Coeficiente estático de fricción de valor 1.
 - Coeficiente dinámico de fricción de valor 0,3.
- Rojo: material flexible (módulo elástico igual al de la silicona), y con coeficiente de variación frente a la temperatura positivo ($CTE = 0,03$). Sus condiciones de fricción son iguales a las del material gris.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

- Verde: material flexible (módulo elástico igual al de la silicona), y con coeficiente de variación frente a la temperatura negativo ($CTE = -0,02$). Sus condiciones de fricción son iguales a las de los materiales gris y rojo.

Con dicha colección de materiales, se pretende que la fase roja del robot se expanda cuando se producen variaciones de temperatura positivas sobre la referencia ambiente, y viceversa para el material verde. Las deformaciones obtenidas frente a una variación de temperatura de 8°C sobre la referencia ambiente se muestran en la siguiente figura.

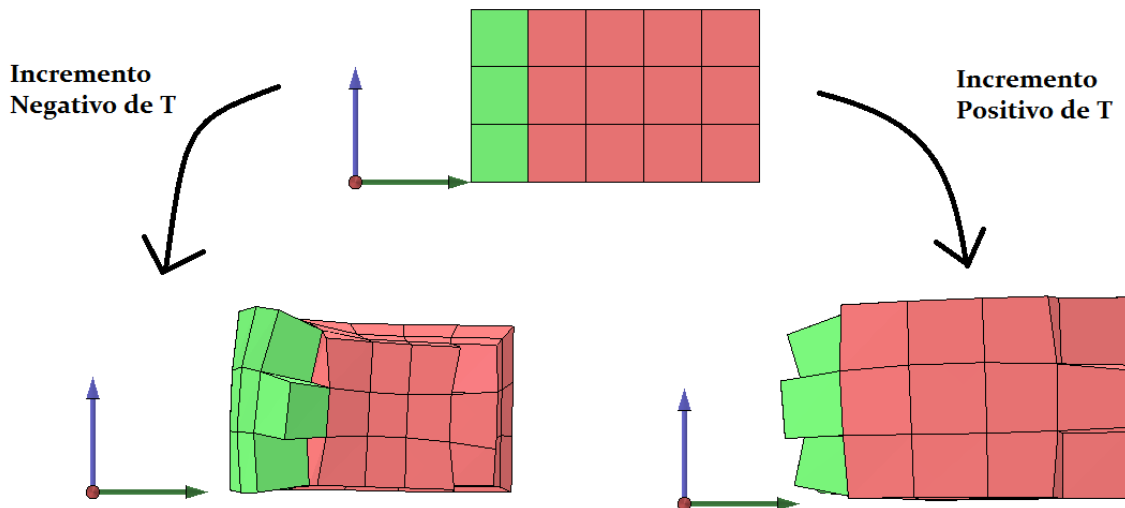


Figura 4-52: Deformaciones experimentadas por el modelo ensayado en función del incremento de temperatura, T .

Combinando dichos movimientos, se consigue que la figura avance sobre el suelo en línea recta, a lo largo del eje marcado en verde. Sobre esta base, se decide iniciar las simulaciones.

SIMULACIÓN 1

- Materiales originales descritos anteriormente (Gris, Rojo, Verde).
- Período de oscilación, $t=0,33$ s.
- Gravedad activada.
- Tiempo de la simulación, 30 s.
- Coeficiente de fricción dinámico 0,3.

Se procede a variar el intervalo de temperatura en torno al cual se produce la deformación. Se llevan a cabo pruebas con 8 y 10°C respectivamente. Se comprueba, que incrementar la amplitud de la oscilación permite la marcha a mayor velocidad, ya que para el mismo tiempo de simulación (30 segundos) se alcanza mayor distancia en el segundo caso.

Traducido a la construcción de robots tipo FEA, esto equivaldría a producir variaciones de la presión interior máxima que se alcanza en las cámaras del robot, siendo favorable un incremento de dicha presión máxima.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

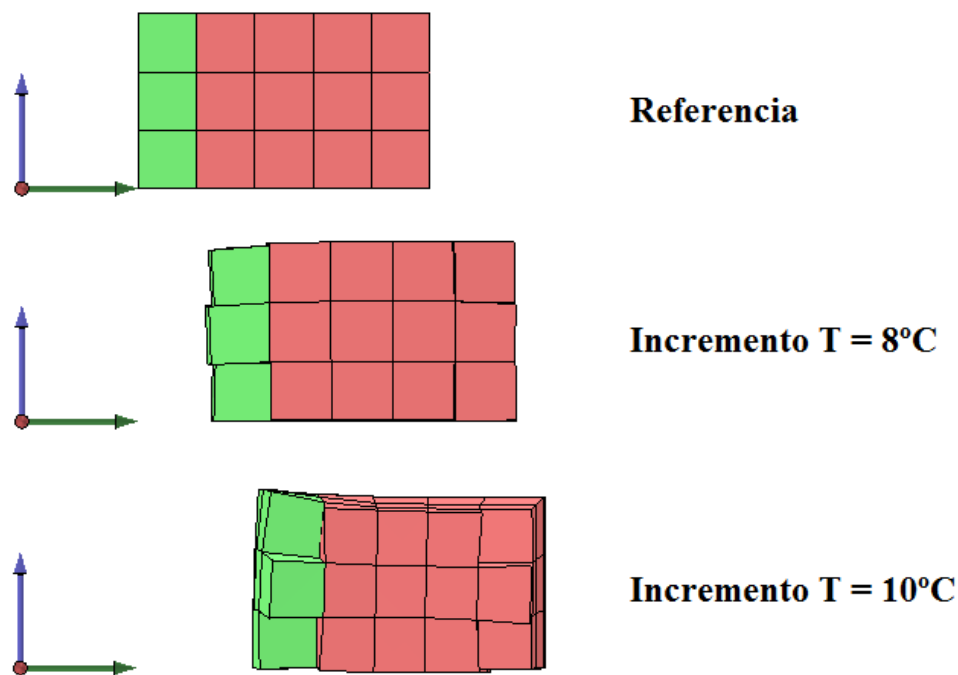


Figura 4-53: Avance del modelo ensayado en función del incremento de temperatura, T .

Los resultados de las simulaciones llevadas a cabo se recogen a continuación:

| Ensayo | Incremento T | Posición X | Posición Y |
|--------|----------------|------------|------------|
| 0 | Referencia | 5,5 | 4,5 |
| 1 | 6 | 5,43 | 6,11 |
| 2 | 8 | 5,79 | 6,16 |
| 3 | 10 | 5,37 | 7,04 |
| 4 | 12 | 5,82 | 6,69 |
| 5 | 14 | 5,63 | 9,08 |

Tabla 4-5: Resultados de la simulación.

Se pueden observar las siguientes tendencias:

- La variación oscilante de la temperatura con amplitud igual a 'Incremento T ' genera la deformación del cuerpo de forma adecuada, y con ello el avance de su centro de gravedad en dirección Y.
- Existe, a priori, una relación entre el incremento de la amplitud de la variación de temperatura y el desplazamiento obtenido en dirección Y. Sin embargo, existen algunas medidas que se desmarcan de dicha tendencia, y otras que ofrecen un salto relativo entre incrementos poco significativos. Esto descarta la linealidad de la relación citada, y complica el análisis entre ambas variables. Lo citado se muestra en los siguientes gráficos.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

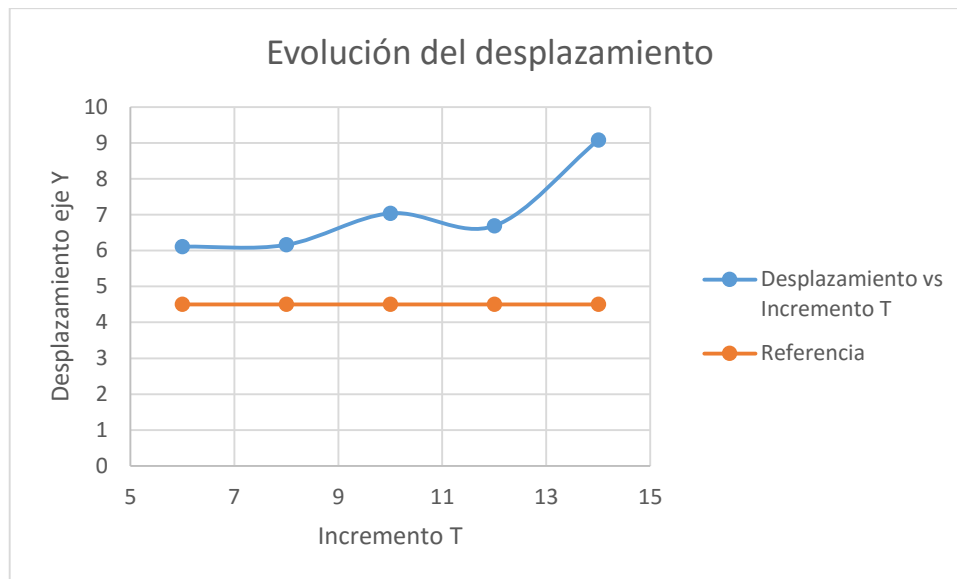


Figura 4-54: Gráfico de resultados de la simulación.

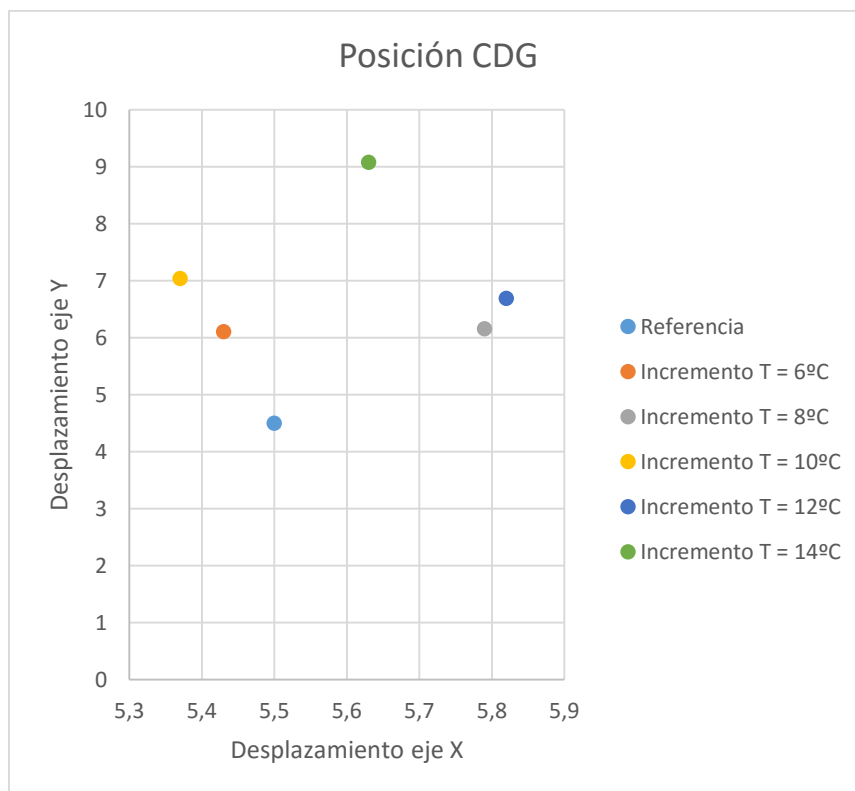


Figura 4-55: Gráfico de resultados de la simulación.

SIMULACIÓN 2

- Período de oscilación, $t=0,33$ s.
- Gravedad activada.
- Tiempo de la simulación, 30 s.
- Amplitud del incremento de temperatura, $T = 10^{\circ}\text{C}$.

En esta ocasión, se procede a modificar el coeficiente de fricción dinámico de los materiales respecto del suelo, para explicar la influencia de dicho factor. Se comprueba que

4. DISEÑO Y DESARROLLO

cuanto mayor dicho coeficiente, mayor es la velocidad de desplazamiento del cuerpo. Sin embargo, cuando se reduce la fricción entre silicona y suelo por debajo de un cierto límite, el robot es incapaz de desplazarse sobre la superficie.

De hecho, para ese caso de fricción reducida, se verifica que el impulso del robot en lugar de lograr un avance sobre el eje objetivo, gira en torno al eje vertical, producto de dicha escasa adherencia.

Se recogen los resultados analizados en la siguiente figura.

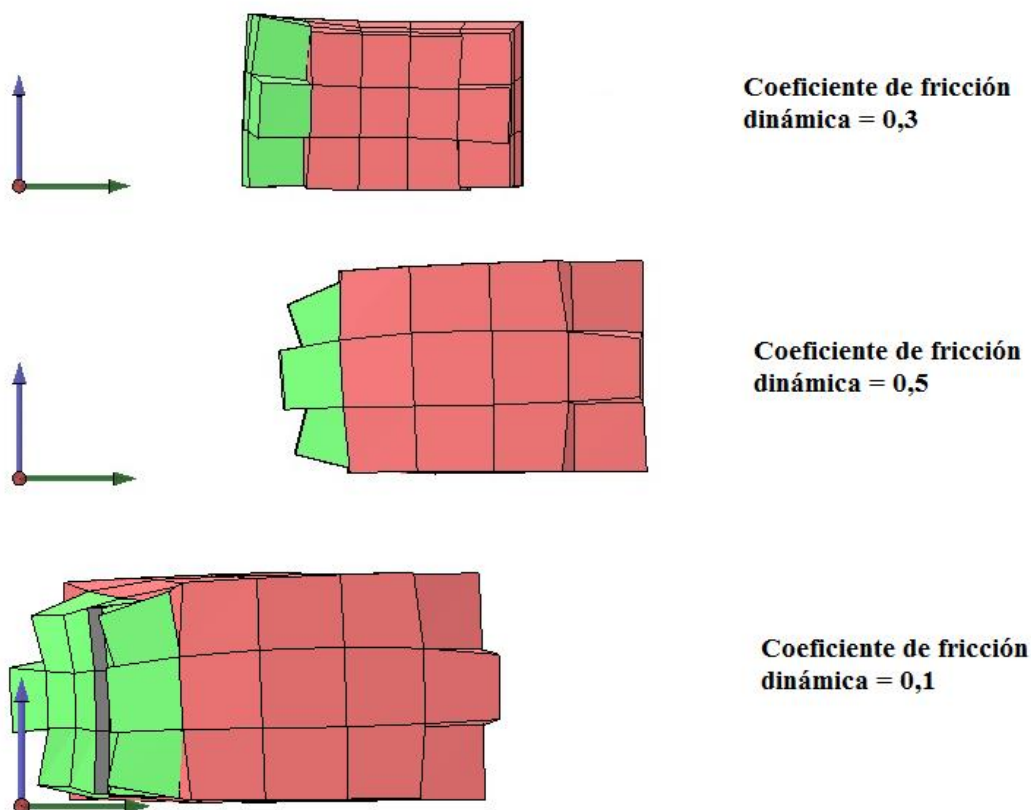


Figura 4-56: Deformaciones experimentadas por el modelo en función del coeficiente de fricción entre él y la superficie de avance.

Se recogen también los datos de los ensayos en las siguientes tablas y gráficos.

| Ensayo | Coef. Fricción | Posición X | Posición Y |
|--------|----------------|------------|------------|
| 0 | Referencia | 5,5 | 4,5 |
| 1 | 0,1 | 6,22 | 3,53 |
| 2 | 0,3 | 5,42 | 6,97 |
| 3 | 0,5 | 5,47 | 8,03 |
| 4 | 0,7 | 5,51 | 9,28 |
| 5 | 0,9 | 5,54 | 10,6 |

Tabla 6: Resultados de la simulación.

Se observa que en el centro de masas:

4. DISEÑO Y DESARROLLO

- Para todos los casos de coeficiente de fricción por encima de 0,3 (inclusive), se produce un desplazamiento positivo según el eje Y de avance, mientras que la coordenada X se mantiene cercana a la referencia.
- Para coeficiente de fricción 0,1 se produce un efecto contrario al buscado, ya que la posición del centro de masas se retrasa respecto al eje de avance, y se desplaza en horizontal (viendo la figura tridimensional, el cuerpo rota).

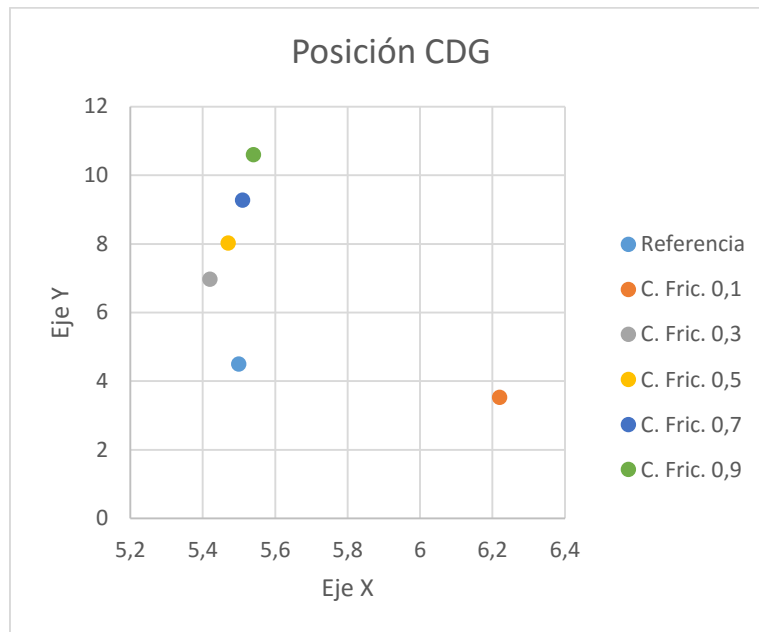


Figura 4-57: Gráfico de resultados de la simulación.

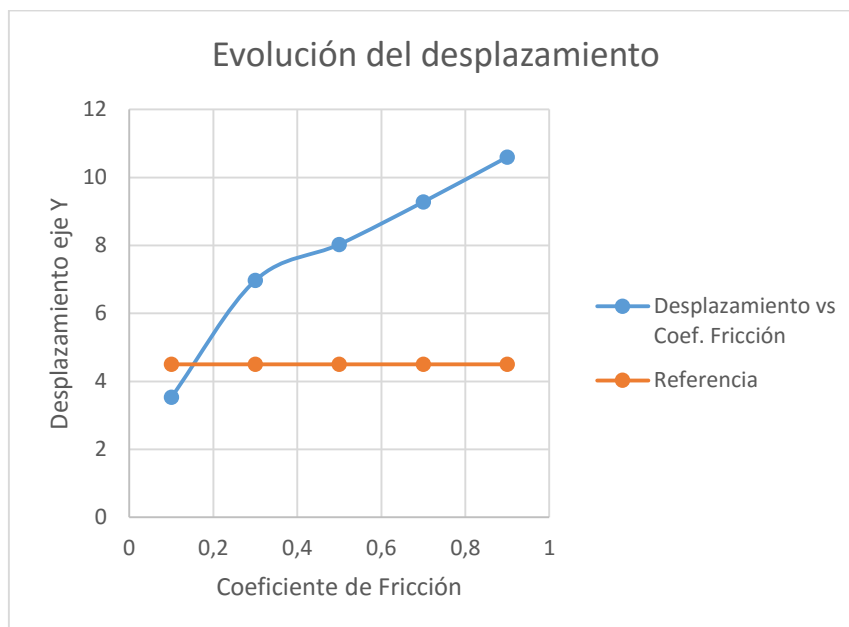


Figura 4-58: Gráfico de resultados de la simulación.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

4.2.2 CAMINANTE CUADRÚPEDO

Una vez analizada la influencia de los diferentes factores que afectan a la marcha del robot, se procede al análisis de un caminante de tipo cuadrúpedo, a semejanza del que se pretende construir.

El diseño de análisis es el mostrado en la figura siguiente. Se compone igualmente de tres materiales, dos de ellos antagonistas deformables (rojo y verde), y otro rígido (gris).

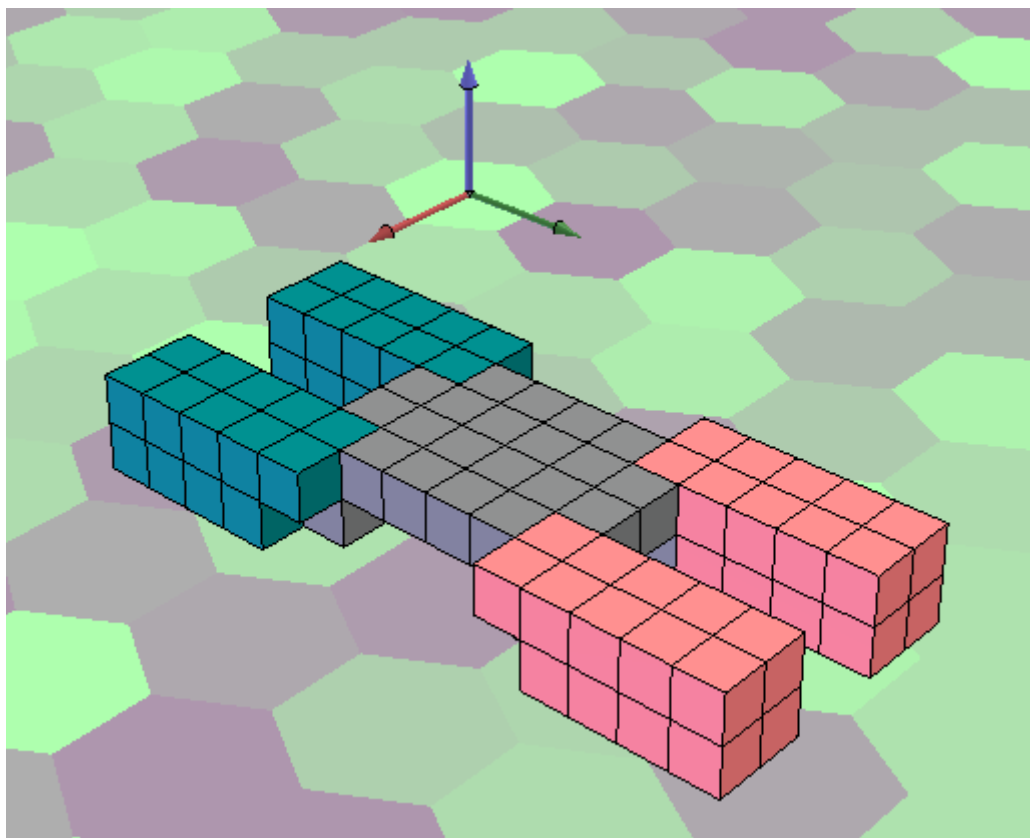


Figura 4-59: Modelo de caminante cuadrúpedo empleado en la simulación.

Realizado el diseño, se procede a su simulación con los siguientes parámetros:

- Coef. Fricción dinámica 0,3.
- Incremento de temperatura T, 5°C.

Se obtienen los siguientes resultados durante una simulación de 30 segundos.

| Ensayo | Posición X | Posición Y |
|------------------|------------|------------|
| 0 (Referencia) | 10 | 14 |
| 1 (30 s después) | 10,6 | 35,2 |

Tabla 4-7: Resultados de la simulación.

Se comprueba como el diseño es capaz de desplazarse más de una vez su propia longitud durante el período de tiempo de la simulación. Si se considera además que los valores de coeficiente de fricción e incremento de temperatura seleccionados son relativamente pequeños en relación a los valores analizados en la fase 2.1, se puede apreciar la eficiencia de esta solución frente a otras más rudimentarias.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

Uno de los factores que no se han tenido en cuenta en el estudio es el tiempo que tarda la temperatura en oscilar en torno a la referencia. Esto es, no se ha medido la influencia del periodo de la variación.

El ensayo anterior se lleva a cabo con período $t = 0,2$ s. Si se repite el experimento con períodos más lentos, se observa la siguiente tendencia.

| Ensayo | Período | Posición X | Posición Y |
|--------|---------|------------|------------|
| 1 | 0,2 | 10,6 | 35,2 |
| 2 | 0,3 | 10,2 | 17,1 |
| 3 | 0,5 | 10 | 12,9 |
| 4 | 0,8 | 10 | 11,7 |

Tabla 4-8: Resultados de la simulación.

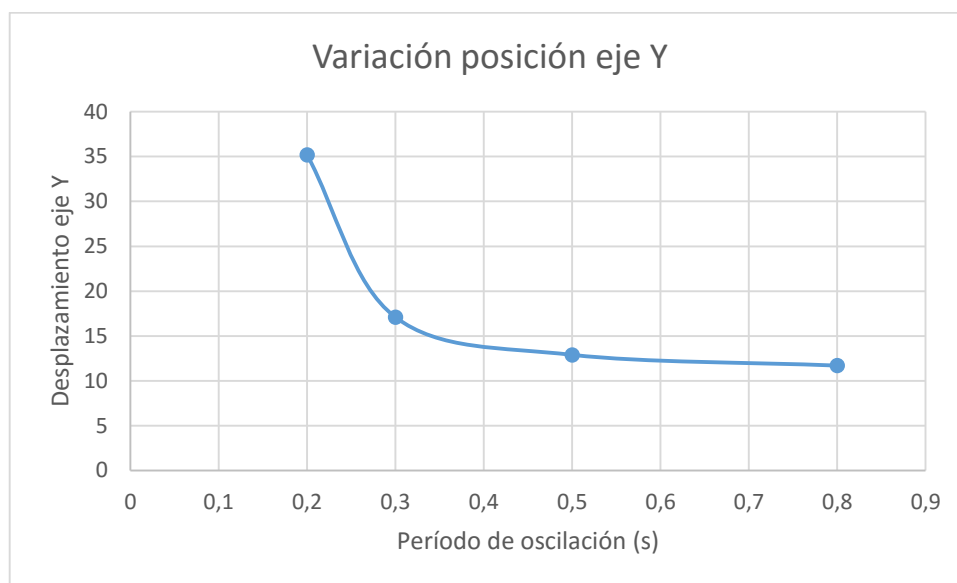


Figura 4-60: Gráfico de resultados de la simulación.

Como se observa, existe una pérdida fuerte de rendimiento en el movimiento del robot conforme se incrementa el período de oscilación respecto de la referencia ($t=0,2$ s), manteniéndose después aproximadamente estable el desplazamiento para valores por encima de $t=0,4$ s.

Efectuando pruebas posteriores, se descubre el siguiente efecto: para períodos menores de 0,2 segundos, el robot sigue incrementando la longitud total desplazada, pero se mueve en dirección negativa del eje Y. Se desconoce cuál es la causa de este comportamiento, pero sí que es posible efectuar la siguiente reflexión sobre el estudio:

- En la evaluación de la influencia que el período tiene sobre el avance del robot no se ha considerado la realidad física del montaje de actuación y control del robot. Esto quiere decir, que los elementos de accionamiento (relés, válvulas) y el llenado de las cámaras hasta alcanzar la presión de trabajo llevan un cierto tiempo, que limita el período mínimo que puede utilizarse.

4.3 DISEÑO DEL ROBOT

Teniendo en cuenta los resultados de las fases 1 y 2 del diseño, y considerando los resultados que arrojan sus simulaciones, se procede al diseño de un prototipo de robot cuadrúpedo.

Siguiendo el montaje llevado a cabo por el equipo del MIT [11], se emplea un esquema de 5 cámaras neumáticas de tipo ramificado en dos direcciones, siguiendo la tendencia de diseño más favorable descubierta en el análisis por elementos finitos. La distribución de cámaras se muestra en la siguiente imagen.

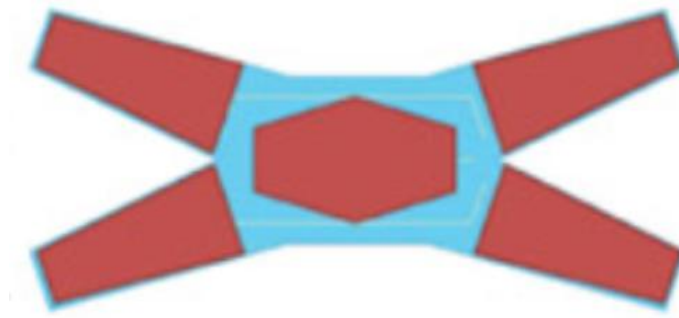


Figura 4-61: Modelo de robot cuadrúpedo.

De este modo, para la construcción del robot es necesario el empleo de moldes que permitan obtener el robot con el menor número de piezas posible, facilitando así su montaje posterior. Es por ello, por lo que se divide la fabricación en dos cuerpos:

- A) Cuerpo con vejigas: parte superior del diseño, su forma adopta la silueta del robot, e incluye las cámaras en las que se inyecta el aire. El molde para su fabricación es el siguiente:

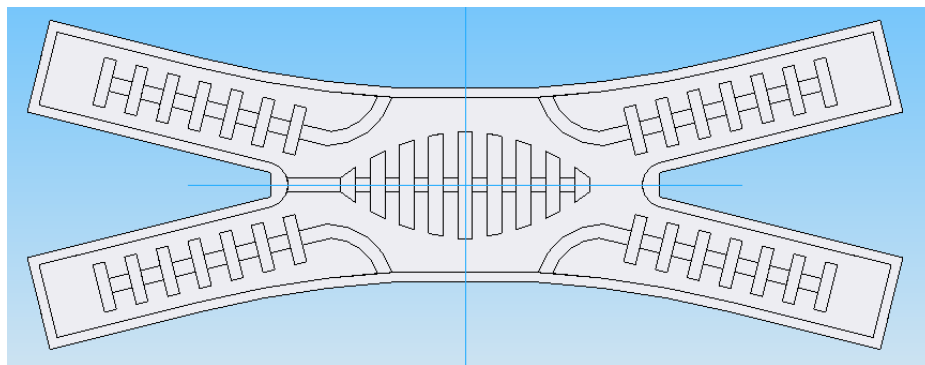


Figura 4-62: Molde superior.

- B) Cuerpo sin vejigas: para completar el diseño, se fabrica un segundo cuerpo, con la misma silueta exterior, pero plano, y sin vejigas. El molde para su fabricación es el siguiente:

4. DISEÑO Y DESARROLLO

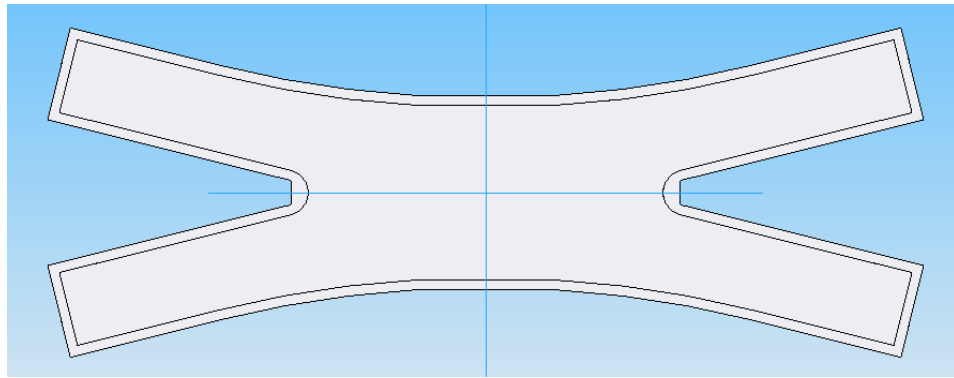


Figura 4-63: Molde inferior.

El esquema de fabricación seguido para el montaje de los cuerpos viene dado en la siguiente figura (Robert F. Shepherd et al. 2011)[11]:

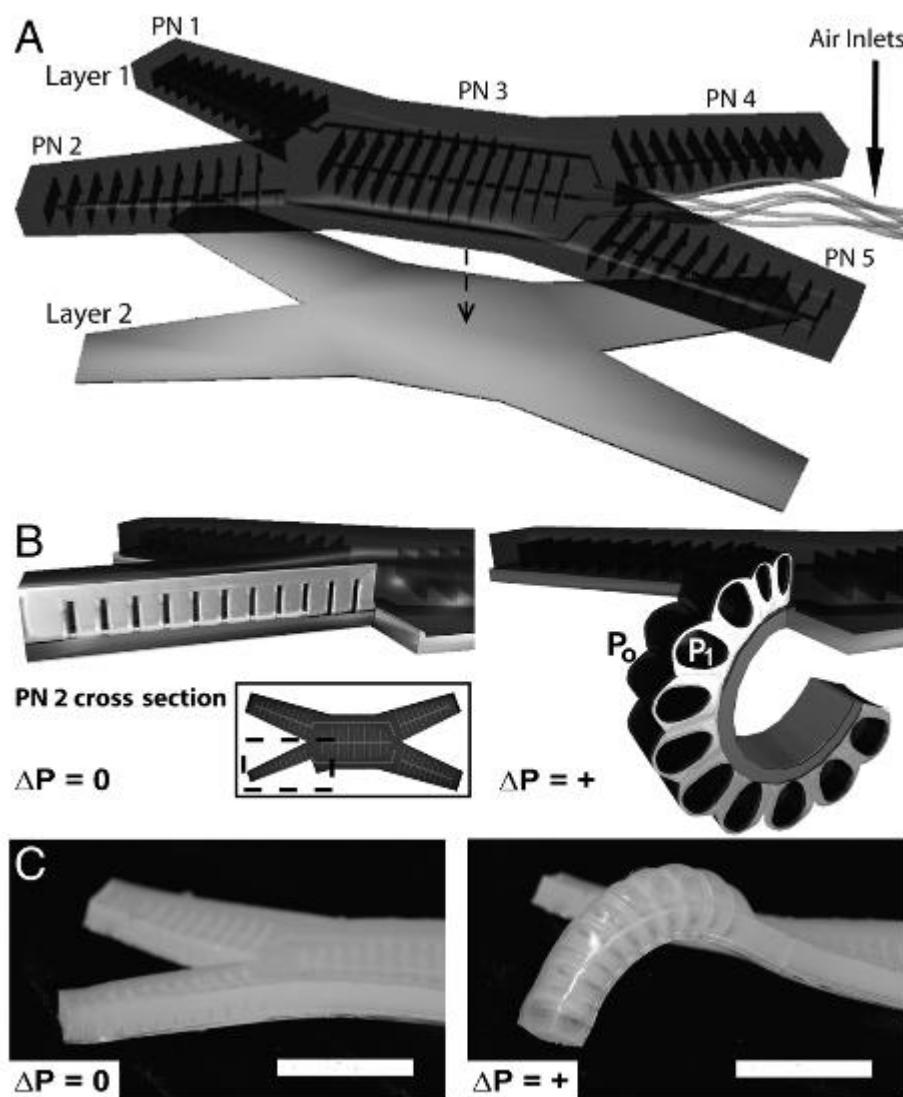


Figura 4-64: Construcción y deformación del robot cuadrúpedo [11].

4. DISEÑO Y DESARROLLO

Como se muestra en el esquema, las dos capas del robot se unen entre sí para dar un único cuerpo, que se infla de manera adecuada cuando el aire ocupa las cámaras interiores talladas en el cuerpo superior.

4.4 CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT

La figura expuesta (4-61) muestra el modo constructivo que ha de emplearse para construir el robot cuadrúpedo. Dicho esquema, como se ha indicado, es el seguido por el grupo de investigadores de Harvard [11].

En el caso particular del proyecto desarrollado en este trabajo, los pasos de construcción difieren en cierta medida, y el proceso final es el resultado de varias iteraciones constructivas, que permiten ir subsanando diferentes errores e imprevistos de fabricación que no han sido previstos en la fase de diseño.

Se procede pues, a exponer la secuencia de mejoras que resultan en el proceso definitivo de construcción.

ETAPA 1

Como primer intento de construcción, se pretende imitar el proceso del trabajo referencia [11]. En él, los cuerpos superior e inferior del robot se unen directamente empleando silicona para pegar las piezas entre sí.



Figura 4-65: Parte superior del robot, lista para ser pegada.

El robot construido de este modo presenta, como mayor problema, la precisión necesaria para disponer ambas piezas una sobre la otra, de modo que sus perfiles coincidan de forma exacta. Si esto no es así, es plausible que ciertas zonas del robot queden debilitadas respecto a otras, y por tanto la deformación en ellas sea más crítica, pudiendo llegar a romperse.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

Por otra parte, la rigidez que otorga la capa de silicona que une ambas capas es relativamente pequeña, de modo que no se pueden emplear grandes presiones en la cámara, ya que el robot se rompe por la zona de unión.

ETAPA 2

Para solucionar los problemas detectados en la etapa 1, se decide diseñar una capa intermedia de silicona, que permita:

- Aportar mayor rigidez a la zona de contacto entre cuerpo superior e inferior.
- Solventar el posible error de posicionamiento de los cuerpos respectivamente.

En esta etapa, se decide generar la película intermedia de la siguiente forma: tras el curado de los cuerpos, se vierte sobre un recipiente rectangular una capa de muy pequeño espesor de la silicona empleada, y sin dejar que se cure, se posiciona sobre dicha capa el cuerpo superior. De este modo, cuando la capa se cure quedará unida al cuerpo superior, y podrá pegarse sin problemas al cuerpo inferior.

Sin embargo, esta metodología tiene dos problemas:

- Conexionado de los tubos: es difícil asegurar la estanqueidad de los tubos en su conexión exterior.
- Posible taponamiento de las cavidades interiores durante el proceso de posicionamiento del cuerpo superior sobre la capa intermedia, y su posterior curado.

Dichos problemas impiden el funcionamiento correcto del robot, de modo que se procede a una siguiente mejora de la construcción.

ETAPA 3

Para corregir el proceso de construcción empleado en la etapa 2, se propone lo siguiente:

- Construir la capa intermedia por separado.
- Integrar los tubos dentro de la estructura, y pegar la capa intermedia con ellos ya colocados en su posición.



Figura 66: Etapa 3 de fabricación.

4. DISEÑO Y DESARROLLO

Aplicando dicho procedimiento, se solventa el problema de la estanqueidad de los tubos de forma parcial, ya que al integrarse en el interior del cuerpo, su funcionamiento es más eficiente, aunque no se produce una eliminación completa del reflujo gaseoso.

Por otra parte, aparece un problema adicional: al ser los tubos algo más grandes que el hueco dejado para ellos (por motivos de estanqueidad, aprovechando la flexibilidad de la silicona), se dificulta el pegado de la capa intermedia sobre el cuerpo 1, hasta el punto de producirse zonas en las que el contacto entre la capa y el cuerpo es inexistente, produciéndose así una fuga de aire entre las cámaras, y siendo imposible el accionamiento del robot.

ETAPA 4

Para resolver el problema de las fugas internas entre cámaras, se decide no incluir los tubos en el interior del cuerpo como se había hecho en la etapa anterior, permitiendo así un mejor contacto entre la capa intermedia (fabricada igualmente por separado) y el cuerpo superior.

Si bien dicho problema se solventa de forma efectiva, queda por resolver la problemática asociada a los tubos, que al no haberse incluido en la estructura, necesitan sellarse de algún modo para evitar las fugas de aire.

Es por ello por lo que se diseñan unos conectores fabricados con la silicona de construcción del robot, con forma de ‘trompeta’, y que permiten la unión estanca de los tubos. Para asegurar aún más esa unión estanca, los conectores se abrazan al tubo empleando una brida.

En esta última iteración de construcción se consiguen resolver los problemas que aparecen en las etapas citadas, y se consigue que el robot funcione de manera adecuada para poder probarlo.

5. CONTROL

Se pretende abordar en este apartado los diferentes aspectos relacionados con el control y la actuación sobre el robot.

En primer lugar, se recuerda que el dispositivo diseñado dispone de 5 cavidades de inflado independiente, sobre las cuales se lleva a cabo la actuación para conseguir la deformación deseada. Como resultado de dichas deformaciones, combinadas de manera adecuada, se consigue la marcha del robot.

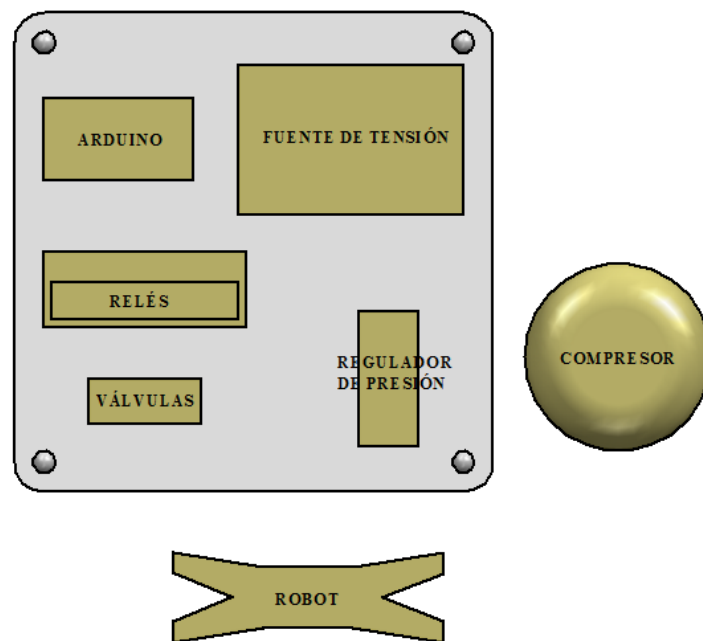


Figura 67: Esquema de la estación de control.

El esquema de elementos de los que se dispone para proceder al diseño de la secuencia de control se muestra en la siguiente figura.

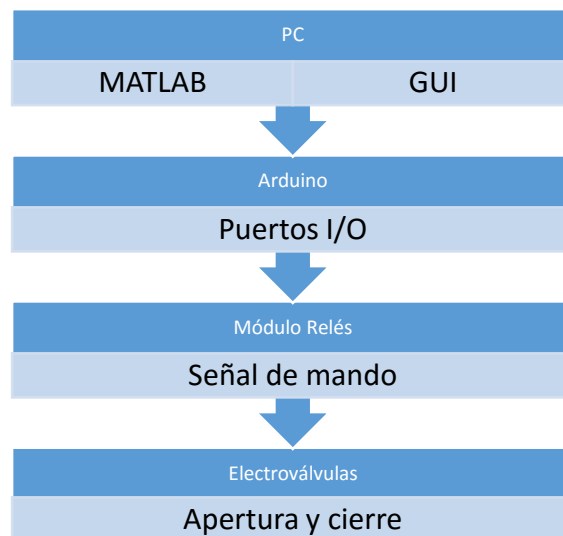


Figura 5-68: Diagrama de comunicación entre los elementos de la estación de montaje.

5. CONTROL

De este modo, se parte de un código elaborado en Matlab y accionado a través de una interfaz gráfica, que permite la selección del modo de marcha que se desea para el robot. El código de Matlab sirve de interfaz entre usuario y microcontrolador Arduino. Éste último, activa los puertos de salida pertinentes, accionando de este modo los relés, y estos a su vez, las electroválvulas.

La necesidad del empleo de un módulo de relés se justifica por:

- Tensión de trabajo de las electroválvulas, que de forma nominal operan a 12 V.
- Necesidad de conexión permanente entre microcontrolador y PC, que obliga a que las señales de salida de la placa Arduino sean de 5 V.
- Necesidad de potencia eléctrica suficiente para el accionamiento de las electroválvulas.

Esto quiere decir, que incluso en el caso de alimentar el microcontrolador con la fuente de tensión de 12 V de la instalación, el propio controlador no es capaz de aportar la potencia eléctrica para el accionamiento simultáneo de las válvulas al carecer del amperaje suficiente.

5.1 VARIABLES BÁSICAS DE CONTROL

Tras la determinación de la instalación de control, es preciso determinar que variables se pretenden controlar para, en función de ellas, llevar a cabo el estudio del movimiento del *soft robot*.

En primer lugar, es necesario entender que el funcionamiento del robot se caracteriza por dos fenómenos: el volumen total de aire que se introduce en la cavidad cuando se acciona, y lo rápido que se introduce ese aire.

Dicha caracterización del proceso de inflado es función de dos variables, a saber:

- Presión de alimentación del circuito neumático
- Tiempo de apertura de las electroválvulas

La presión de alimentación del circuito neumático se relaciona de manera directa con la cantidad de aire por unidad de tiempo que se introduce en la cavidad. A mayor presión, más cantidad de aire pasa a través de la tubería, y más rápido se produce el llenado.

En cuanto al tiempo de apertura de las electroválvulas, para una presión determinada, marca la cantidad total de aire que entra en la cámara, y por ende la cantidad de deformación que se produce en el robot.

Ambas variables, como se puede deducir, están íntimamente relacionadas entre sí, siendo difícil su estudio de manera independiente, y haciéndolo relativamente complejo.

Las dos variables citadas se modifican y se subdividen como se expondrá más tarde para generar así el marco de variables en las que se puede influir a la hora de determinar el estado del sistema (en otras palabras, los grados de libertad del mismo).

Igualmente, es necesario definir los parámetros de salida que se medirán tras la actuación para verificar el funcionamiento del robot. En concreto, se tomarán medidas de desplazamiento lineal del centro de gravedad sobre un cierto intervalo de tiempo, conociendo así su velocidad. Se pondera como positiva la secuencia de actuación que permite un desplazamiento más rápido.

5. CONTROL

Se recuerda el esquema constructivo del robot caminante que se pretende controlar. En él, se identifican 5 cámaras neumáticas, de control independiente.

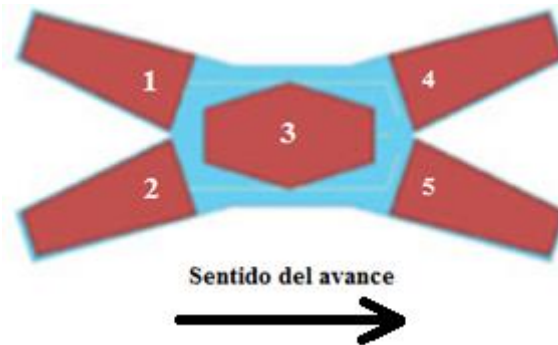


Figura 5-69: Numeración de las cámaras del robot cuadrúpedo.

Las cámaras se numeran tal y como muestra el esquema, ordenadas según el sentido de avance previsto.

De este modo, y si se recuerda la instalación electro-neumática de la que se dispone, se tiene un total de 5 señales digitales de control de la apertura o cierre de las válvulas, y por tanto del llenado de la cámara. A través del código de control, puede efectuarse la regulación independiente de todas las cámaras, combinando su llenado y vaciado de la manera adecuada para conseguir el avance del robot.

Resumiendo lo expuesto anteriormente, se puede decir que el estado y la evolución del sistema vienen determinados por 7 variables o grados de libertad, a saber:

- 5 señales de control de apertura y cierre de las cámaras.
- Presión del sistema neumático.
- Tiempo de apertura de las válvulas.

Sobre estas variables es necesario hacer ciertas aclaraciones:

- Existen tres variables que pueden ser fijadas por el usuario antes del inicio del programa. Con ellas tres, se determinan todas las demás del sistema, produciendo uno u otro tipo de actuación sobre el mismo. Las variables citadas son las siguientes:
 - Presión de actuación: de forma previa al accionamiento, el circuito es regulado a una cierta presión empleando para ello un regulador de presión, integrado en la placa de montaje del circuito neumático.
 - Secuencia de marcha: como se explicará cuando se aborde la interfaz gráfica, permite elegir el modo de marcha con el que funcionará el robot, y que secuenciará el accionamiento de las válvulas.
 - La variable 'Tiempo de apertura de las válvulas' permite determinar una escala global de la deformación del sistema, entre 0 y 1, lo que no quiere decir que todas las válvulas se abran el mismo tiempo: dicha regulación está íntimamente relacionada con la secuencia de marcha, y varía dependiendo de la cavidad a accionar.

5.2 INTERFAZ DE CONTROL

Para regular el sistema descrito anteriormente, se emplea la siguiente interfaz gráfica construida en el editor de Matlab.

En dicha interfaz, se identifican dos partes:

- Parte superior: diseñada para fijar las variables de entrada para la regulación del robot. Se pueden determinar los parámetros del funcionamiento:
 - Secuencia de marcha: es posible elegir entre modo test, ondulante, y caminante. Cada uno de ellos acciona una secuencia de accionamiento diferente, que secuencia la acción de las válvulas de una determinada manera.
 - Volumen de carga: permite fijar dos parámetros relacionados entre sí: la velocidad de ejecución de la secuencia y la deformación que se produce en el robot. Lógicamente, la cantidad de aire que entra en las cámaras es función del tiempo que permanecen las válvulas abiertas, de modo que a mayor ‘volumen de carga’, secuencias más lentas y con mayor deformación, y viceversa.



Figura 5-70: Interfaz de control del robot.

- Número de ciclos: permite seleccionar el número de veces que se repite la secuencia de marcha.
- Parte inferior: permite ver el estado de funcionamiento del robot. Dispone de cinco indicadores, uno por cada cámara, que se activan cuando la válvula de dicha cámara está activa.

5. CONTROL

El control del robot está sujeto, como se ha explicado anteriormente, a la determinación de la presión de entrada al circuito neumático, que a igualdad del resto de variables, marca la capacidad de llenado y deformación de las cámaras (a mayor presión, mayores deformaciones).

Determinando en la interfaz la secuencia de marcha deseada, el robot pone en práctica un modo de funcionamiento u otro. A continuación se exponen dichas secuencias, y el modo en que se han construido, así como la deformación que producen en el robot.

5.3 SECUENCIA DE MARCHA

Se ha expresado anteriormente que el robot tiene programados diferentes modos de funcionamiento, que permiten un avance a través de mecanismos diferentes.

SECUENCIA DE TEST

La secuencia de test está diseñada para comprobar que todas las cámaras funcionan de forma adecuada, del mismo modo que se verifica que la secuencia de accionamiento de las válvulas es el adecuado. La secuencia se representa en el siguiente esquema:

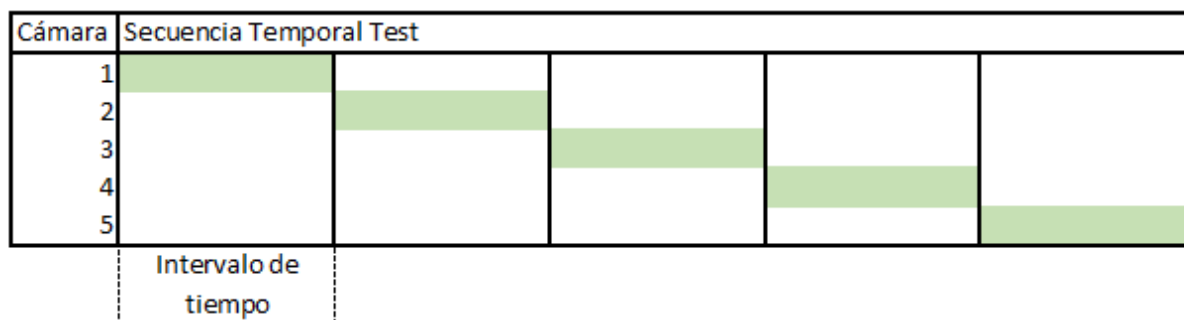


Figura 5-71: Secuencia Test.

Como se muestra de izquierda a derecha, se accionan de una en una las válvulas de forma secuencial, para comprobar que efectivamente el hinchado y vaciado de las cámaras funciona de manera adecuada.

El intervalo de tiempo viene determinado por la variable 'Volumen de carga' introducida en la interfaz gráfica.

SECUENCIA ONDULANTE

El accionamiento de la secuencia ondulante pretende el movimiento del robot a base de forzar la oscilación de su cuerpo en dirección longitudinal, combinando de manera adecuada el inflado de las cámaras. Es relevante indicar que la correcta organización del inflado de las cámaras es de vital importancia para que la secuencia sea efectiva. El proceso seguido es el siguiente:

5. CONTROL

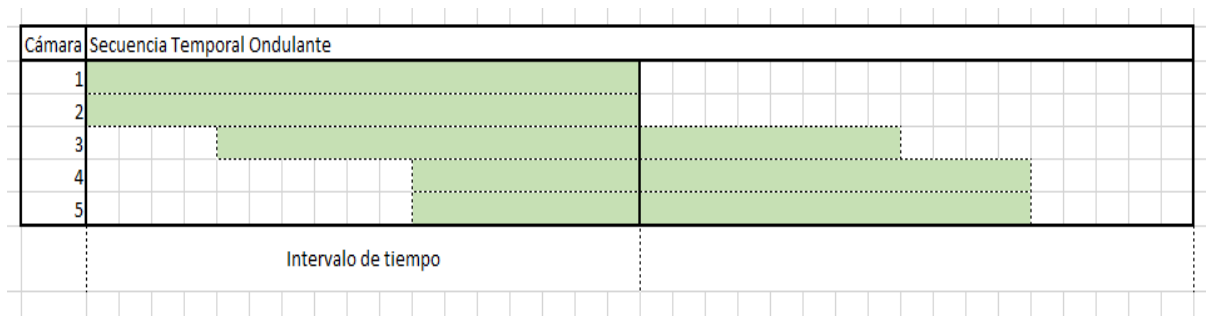


Figura 5-72: Secuencia Ondulante

En el esquema se muestra el ciclo de accionamiento, que ocupa dos intervalos de tiempo, marcados, como se ha dicho, por la variable ‘Volumen de carga’ del robot. Nótese que al final de la secuencia, se mantiene un tiempo de seguridad con todas las electroválvulas cerrada, asegurando así que antes del inicio del ciclo el robot vuelve a su estado original, al menos en las extremidades que antes se activan (1 y 2). De este modo, se asegura que el aire no se almacena entre dos repeticiones consecutivas del ciclo. Si esto pasara, la cámara iría incrementando sucesivamente la cantidad de aire en su interior de un ciclo a otro, poniendo al sistema en una situación de riesgo, al poder explotar y, como es evidente, terminar de ese modo con el funcionamiento global del robot.

Se muestra a continuación una serie de figuras en las que se expone las diferentes deformaciones que experimenta el robot en función del tiempo del ciclo que se encuentra ejecutando.

En primer lugar, se divide la secuencia de funcionamiento en diferentes zonas (A-F), cuyos límites los marca el cambio del estado de las electroválvulas (encendido y apagado de las mismas).

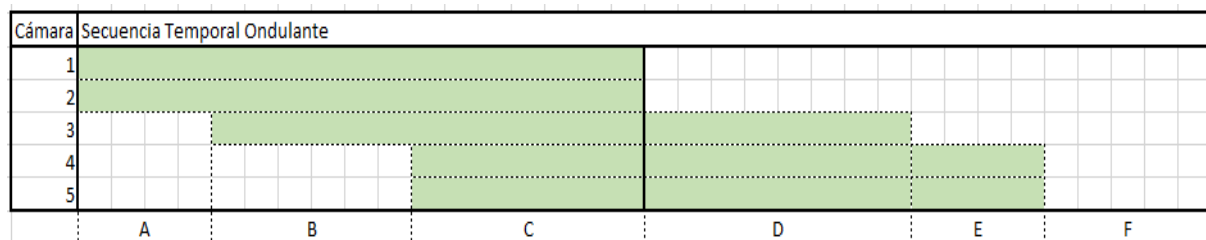


Figura 5-73: Secuencia Ondulante (Fases).

En base a la figura 5-63, se puede explicar la evolución sufrida por el robot en cada etapa:

- A) Inicio de la secuencia, se produce la primera parte del llenado de las cámaras 1 y 2 (extremidades traseras), mientras que el resto de cámaras mantienen su alimentación cerrada.

5. CONTROL



Figura 5-74: Secuencia Ondulante, Fase A.

- B) Con las válvulas de las extremidades traseras aún activadas (cámaras 1 y 2), se inicia el llenado de la cámara intermedia (cámara 3). De este modo se pretende elevar la parte central del robot respecto del suelo, facilitando así su movimiento.



Figura 5-75: Secuencia Ondulante, Fase B.

- C) Empieza la transición de carga desde la parte trasera del robot hacia la delantera, al inflarse las cinco cámaras de forma simultánea. El robot alcanza su máxima altura y deformación, y con esta etapa concluye la primera parte de la mecánica ondulante de la secuencia.



Figura 5-76: Secuencia Ondulante, Fase C.

- D) Se mantiene la alimentación en las válvulas correspondientes a las cámaras central y delanteras (3, 4 y 5). Las cámaras de las extremidades traseras dejan de alimentarse, y proceden a vaciarse.

5. CONTROL



Figura 5-77: Secuencia Ondulante, Fase D.

- E) Se cierra la alimentación de la cámara intermedia (cámara 3), manteniendo únicamente las extremidades delanteras activadas. El cuerpo entra en la última secuencia de su avance.



Figura 5-78: Secuencia Ondulante, Fase E.

- F) Fase de pausa de seguridad, el sistema vuelve a su estado de reposo durante un tiempo para garantizar el vaciado completo de las cámaras antes de reiniciar el proceso, consiguiendo asegurar de esta forma la no acumulación de aire en las cámaras ciclo tras ciclo. Dicha situación es peligrosa e indeseable, ya que puede llevar a la rotura del robot.

SECUENCIA CAMINANTE

La secuencia de control ‘caminante’ pretende conseguir el avance del robot a partir de combinar el movimiento de sus extremidades delanteras y traseras de forma cruzada, y manteniendo la cámara central llena de aire a lo largo del tiempo.

La inspiración para este tipo de marcha viene a partir de la observación de la locomoción de los mamíferos de cuatro patas terrestres, que emplean dicho tipo de coordinación entre sus patas para conseguir el avance de su cuerpo.

La necesidad de mantener la cámara central llena de aire el mayor tiempo posible se explica de la siguiente forma: cuando la cámara central (3) se infla, la zona central del robot, que es la que mayor peso tiene, se eleva sobre el nivel del suelo. Esto implica que hay una parte

5. CONTROL

importante del peso del robot que no se arrastra por fricción con el suelo, permitiendo de este modo el avance. Si se pretendiese mover el robot manteniendo dicho contacto de la zona central con el suelo, el resultado del avance sería ineficiente, y apenas significativo.

El proceso de la secuencia caminante puede observarse en la siguiente figura:

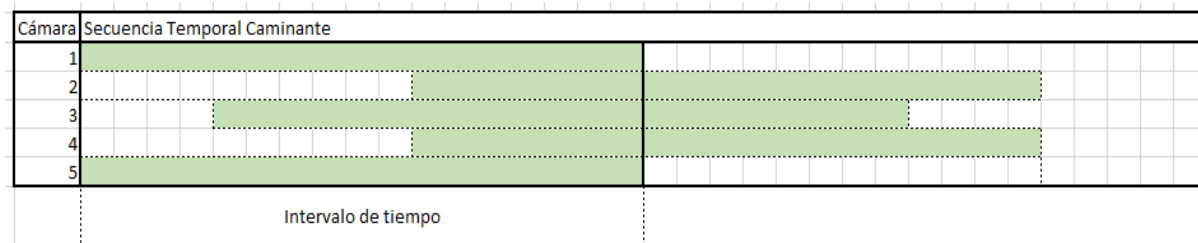


Figura 5-79: Secuencia Caminante.

De nuevo se referencia la duración de la secuencia a la del intervalo de tiempo fijado al establecer la variable ‘volumen de carga del robot’, que, se recuerda, regula la proporción de llenado del sistema: valores mayores de la variable implica que todas las válvulas se mantienen abiertas un mayor tiempo, de forma proporcional al valor fijado.

Si se compara la secuencia caminante con la estudiada anteriormente (ondulante), se comprueba que la secuencia caminante puede obtenerse a partir de la ondulante, intercambiando la actuación de una de las extremidades traseras (2) con la de una de las delanteras (5), consiguiendo así el efecto deseado.

Se ha comentado que era de vital importancia el mantenimiento de la cámara central (3) con aire en su interior el mayor tiempo posible. En la secuencia expuesta en la figura, esto se obtiene situando el inflado de dicha cámara en el medio de la actuación, y durante un tiempo más prolongado que el resto de cámaras.

Sin embargo, puede intentar regularse ese estado ‘estacionario’ de llenado de la cámara central a través de otras técnicas de control. En el caso ideal, se diseñaría un bucle cerrado de control, en el que gracias a la realimentación del estado instantáneo de la cámara, se comandaría el llenado o no de la misma, en función de la necesidad.

Pero como se expuso al comienzo del trabajo, el desarrollo de sistemas cerrados de control en este tipo de robots se encuentra aún en fase primaria, y es por ello por lo que la regulación del fenómeno explicado ha de hacerse ‘manualmente’, o lo que es lo mismo, a través de una iteración de ensayos hasta dar con una secuencia efectiva.

De cara a conseguir dicha secuencia efectiva, hay un detalle que ha de establecerse de forma previa: la cámara, por su diseño, y para una misma transferencia de aire, tarda menos tiempo en llenarse que en vaciarse. Dicho de otro modo, el vaciado de la cámara es lento, y eso supone tener que permitir el tiempo suficiente de expulsión de aire para evitar una situación indeseable: podría darse el caso en el que se retome el inflado de la cámara cuando no se ha vaciado completamente. En esta situación, el volumen total de aire que almacena tras cada ciclo va aumentando, y llegado un cierto punto el robot puede estallar.

Dicho esto, la alternativa al inflado expuesto en la secuencia ‘caminante’ consiste en la apertura de la válvula durante un periodo de tiempo inicial de mayor duración, para

5. CONTROL

posteriormente pasar a efectuar secuencias de vaciado y llenado de menor duración, de forma alternativa.

Se ilustra un ejemplo de control sobre la cámara intermedia en la figura adjunta. Como puede observarse se sigue el patrón formado por un inflado de mayor entidad en primer lugar, para después mantener el volumen de aire a base de alternar pequeños intervalos de vaciados y llenados, siendo los vaciados algo más largos que los llenados.

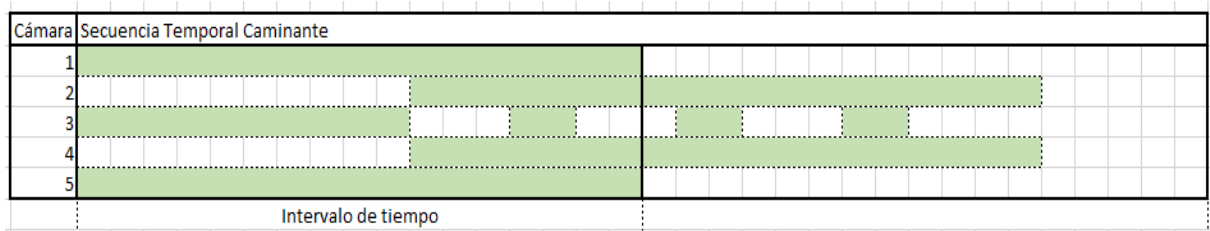


Figura 5-80: Variación sobre la secuencia caminante.

El problema de regulación que se ha expuesto es propio del sistema neumático con el que cuenta la instalación del proyecto. Debido al empleo de válvulas de tipo 3/2, sus estados binarios solo permiten introducir aire o extraer aire de la cámara. En caso de emplear válvulas de tipo 3/3, se habilita la posibilidad de dejar un estado intermedio en el cual se encierra el volumen de aire en la cámara neumática, sin posibilidad de retorno.

Entre los motivos que llevan al descarte del empleo de este tipo de actuadores, se encuentra, fundamentalmente, el coste.



Figura 5-81: Accionamiento de las cámaras 1, 3 y 5.

Se adjuntan algunas imágenes del funcionamiento de esta secuencia de marcha, en la que se pueden ver el accionamiento alternativo de las extremidades delanteras y traseras, siguiendo el principio explicado.

5. CONTROL



Figura 5-82: Accionamiento de las cámaras 2, 3 y 4.

5. CONTROL

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras la definición del funcionamiento del robot, sus diferentes secuencias de marcha, y las variables que influyen a su puesta en marcha, es necesario llevar a cabo diferentes ensayos que permitan verificar la influencia citada, así como las tendencias que las variación de los parámetros de relevancia marcan en el comportamiento del sistema.

Dicho de otro modo, se diseñan una serie de experimentos que permiten obtener variables de salida que miden la tasa de éxito conseguido con el diseño creado.

6.1 ENSAYOS

Como se ha dicho, para llevar a cabo un análisis y valoración del comportamiento del robot en diferentes condiciones de funcionamiento, es preciso diseñar y poner en marcha experimentos y ensayos. En los mismos, en base a ciertos parámetros de entrada al sistema, se obtiene una respuesta determinada. Variando los ‘*inputs*’ del ensayo se obtienen diferentes resultados, los cuales es conveniente analizar y describir en función de las modificaciones de las variables de entrada.

INSTALACIÓN

Con los diferentes elementos expuestos con anterioridad (módulos de potencia eléctrica, electrónica y neumática), se realiza un montaje como el que se observa en la figura.



Figura 5-83: Instalación para el ensayo del robot, que incluye el PC (A), el compresor neumático (B), la estación base (C), el robot (D) y la escala métrica (E).

Los elementos de la instalación son los siguientes:

- PC (A): en él se ejecuta el código de Matlab y la interfaz gráfica que permiten fijar las variables internas de actuación.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Compresor neumático (B): constituye la toma de presión del circuito, es de accionamiento eléctrico (motor en negro) y almacena el aire comprimido en su depósito (en rojo) hasta un cierto límite de seguridad.
- Estación de control (C): expuesta anteriormente, contiene los elementos necesarios para la ejecución de las secuencias de control, transformando la potencia eléctrica y neumática de entrada una determinada actuación sobre el robot.
- Robot (D): diseñado y construido siguiendo los procesos expuestos en las correspondientes secciones del trabajo, se conecta a la estación de control (C) a través de tubo de poliuretano blanco.
- Escala métrica (E): permite la toma de medidas de desplazamiento del robot tras la secuencia de marcha.

METODOLOGÍA DE ENSAYO

El proceso seguido para llevar a cabo las pruebas de funcionamiento del robot sigue un determinado protocolo para garantizar el correcto desempeño de todos los componentes.

En primer lugar, es necesario asegurar que tanto la fuente de tensión, como el compresor se encuentran conectados, proveyendo así al sistema de la potencia eléctrica necesaria y el aire comprimido suficiente, respectivamente.

Tras esta comprobación, se fija la variable ‘externa’ a la interfaz gráfica de control de Matlab: la presión de alimentación del circuito neumático. A la salida del compresor se dispone de un regulador de presión con manómetro integrado que permite la regulación de esta variable. Ha de fijarse un determinado valor de forma previa al inicio de las pruebas.

A continuación, se conecta el microprocesador Arduino al PC a través del puerto USB correspondiente, y se carga en Matlab el código de la interfaz gráfica. Tras su conexión, se está en disposición de ajustar los parámetros de la simulación.

Entre los parámetros a seleccionar en la interfaz se encuentran la secuencia a accionar (test, ondulante, o caminante), el volumen de carga que entrará a las cámaras del robot, y el número de repeticiones que se desean para el ciclo determinado.

El procedimiento diseñado para la puesta en marcha del robot obliga a ejecutar ciertos pasos previos para garantizar que la instalación funciona, y no se ha producido ningún error de cableado o conexionado neumático que pudiera dejar el sistema ‘congelado’ en un estado indeseable (como por ejemplo el inflado de una cámara; en caso de fallar el sistema en este estado, la presión en el robot seguiría incrementándose hasta la rotura del mismo).

El sistema de seguridad diseñado consta de los siguientes pasos:

Regulación de la presión hasta el cierre completo de la alimentación neumática, impidiendo la entrada de aire desde el compresor al robot.

Ejecución de la secuencia de marcha ‘test’ con volumen de carga igual al 50%, y comprobar que los relés se activan en la secuencia deseada. Para ello puede recurrirse al panel de funcionamiento que incorpora la interfaz gráfica, o mirar directamente el módulo de relés.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Manteniendo el volumen de caga al 50%, apertura de la regulación de presión hasta 0.5 bar, y ejecutar la secuencia de marcha ‘test’. Comprobar que el inflado de las cámaras se ejecuta en el orden establecido por la secuencia. Accionar la secuencia con diferentes números de repeticiones (1-5-10).

En caso de no haber fallado ninguna de las comprobaciones anteriores, se permite entonces seleccionar el modo de funcionamiento deseado con los parámetros del sistema, e iniciar su funcionamiento nominal.

ENSAYOS Y RESULTADOS

Siguiendo las pautas marcadas en el epígrafe anterior, se llevan a cabo los siguientes ensayos:

- A) Ensayos con la secuencia ‘ondulante’: la secuencia ondulante permite el avance del robot a través de accionar sus cámaras en una secuencia que avanza desde su parte trasera hacia la delantera, haciendo ondular su geometría para ello.

Tras ajustar la secuencia, se realizan dos pruebas con los resultados mostrados a continuación.

| Ensayo | Presión (bar) | Volumen de carga (%) | Repeticiones | Avance (mm) |
|--------|---------------|----------------------|--------------|-------------|
| a | 1 | 50 | 10 | 8 |
| b | 1 | 65 | 10 | 12 |

Tabla 5-9: Ensayo con fricción elevada.

El avance obtenido dista del esperado, por lo que se decide revisar cuál puede ser la causa. Tras el análisis del vídeo de la prueba, se observa que el funcionamiento de las extremidades delanteras entorpece el avance del robot, frenándolo. Es por esto, por lo que se decide efectuar una modificación de las mismas, incorporando a su parte inferior un adhesivo con acabado liso, que reduce su fricción con la superficie de contacto. De este modo, las extremidades delanteras pueden deslizar en el sentido de la dirección de avance, y se mejora de forma significativa el resultado obtenido.

Los ensayos llevados a cabo con esta modificación arrojan avances de mayor magnitud para las mismas secuencias.

| Ensayo | Presión (bar) | Volumen de carga (%) | Repeticiones | Avance (mm) |
|--------|---------------|----------------------|--------------|-------------|
| 1 | 1 | 35 | 10 | 10 |
| 2 | 1 | 50 | 10 | 30 |
| 3 | 1 | 65 | 10 | 47 |
| 4 | 1.25 | 50 | 10 | * |
| 5 | 0.75 | 35 | 10 | 5 |
| 6 | 0.75 | 50 | 10 | 15 |
| 7 | 0.75 | 65 | 10 | 24 |

Tabla 5-10: Ensayo con fricción reducida en las extremidades delanteras, para la secuencia ondulante.

Los resultados arrojan una influencia clara de la presión y el volumen de carga como variables de relevancia dentro de la propia secuencia de marcha. La relación puede

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

observarse en el gráfico de la figura 5-78, en el cual se aprecian con claridad las siguientes tendencias:

- Mayor presión de alimentación al circuito neumático provoca un mayor avance, para un mismo volumen de carga. Esto se debe a la entrada de una mayor cantidad de aire en un mismo tiempo, lo que lleva a una mayor deformación a lo largo de la secuencia, y con ella un mayor avance.
- Mayor volumen de carga en el accionamiento provoca un mayor avance, para un mismo valor de la presión. Esto se puede explicar de forma similar al caso anterior, ya que para una misma presión, un incremento del volumen de carga lleva a periodos de apertura de válvulas más largos, entrando así una mayor cantidad de aire a la cámara, y produciendo mayores deformaciones.

Merece la pena reseñar que un incremento excesivo de la presión de entrada ($P = 1.25$ bar) lleva a una situación de riesgo para el robot, si se pretende accionarlo a un volumen de carga intermedio. Esto se ve en el ensayo número 4, en el que con dicho valor de la presión y volumen de carga igual a 50% el vaciado de la cámara no es lo suficiente entre llenado y llenado, produciéndose así una situación peligrosa al final de las 10 repeticiones. De hecho el ensayo se aborta, por seguridad, a la quinta repetición.

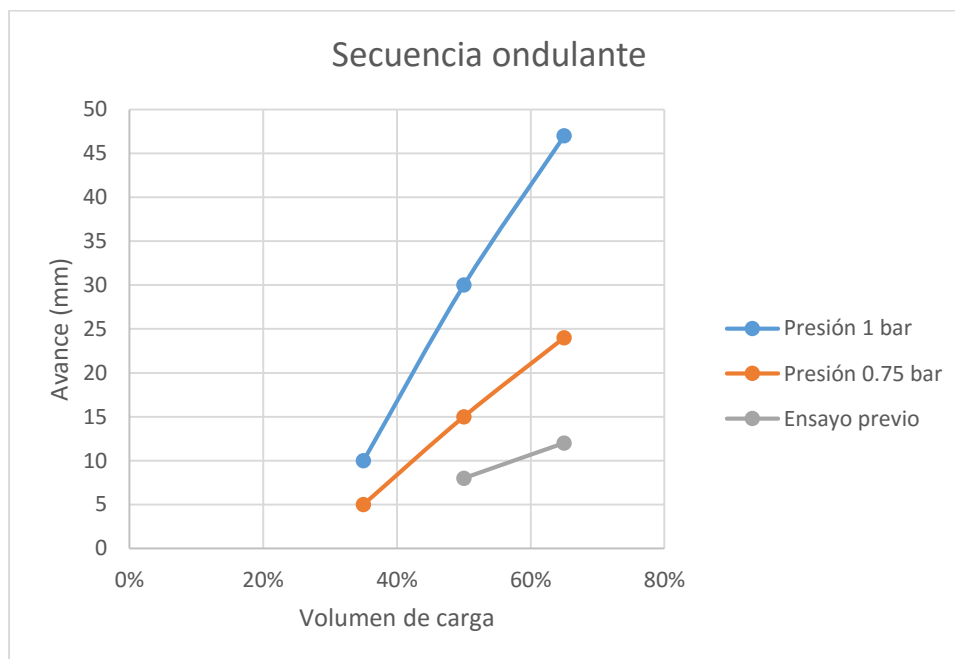


Figura 5-84: Gráfico de resultados de la secuencia caminante.

Como se observa en el gráfico, la relación entre el avance y el volumen de carga es prácticamente lineal en el intervalo de interés. Del mismo modo, se observa cómo mejoran los resultados globales cuando se produce el cambio de condiciones de fricción entre el ensayo previo (elevada fricción en las extremidades delanteras), y el resto de ensayos.

- B) Ensayos con la secuencia ‘caminante’: la secuencia ondulante alterna el movimiento de extremidades delanteras y traseras accionadas en diagonal para permitir el avance del

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

robot. En otras palabras, mientras que la cámara central se mantiene inflada la mayor parte del tiempo, se alterna el inflado del resto de extremidades, activando al mismo tiempo la trasera izquierda y delantera derecha, o viceversa, trasera derecha y delantera izquierda.

Tras llevar a cabo el ajuste de la secuencia, se procede al ensayo de la secuencia, obteniendo los resultados mostrados en la tabla. Merece la pena mencionar que se comprueba también antes del inicio que esta secuencia se beneficia también de la asimetría en las condiciones de fricción: si se mantienen los adhesivos situados en las extremidades delanteras, los avances mejoran. Se omiten en este caso las pruebas sin adhesivos.

| Ensayo | Presión (bar) | Volumen de carga (%) | Nº repeticiones | Avance (mm) |
|--------|---------------|----------------------|-----------------|-------------|
| 1 | 1 | 40 | 10 | 22 |
| 2 | 1 | 50 | 10 | 25 |
| 3 | 1 | 65 | 10 | 37 |
| 4 | 0.75 | 40 | 10 | 13 |
| 5 | 0.75 | 50 | 10 | 20 |
| 6 | 0.75 | 65 | 10 | 33 |
| 7 | 1.25 | 30 | 10 | 17* |

Tabla 6-11: Resultados del ensayo con la secuencia caminante.

De nuevo los resultados arrojan una influencia clara de la presión y el volumen de carga como variables de relevancia dentro de la propia secuencia de marcha, siguiendo la relación de influencia expuesta anteriormente. Todos aquellos ajustes que llevan a introducir una cantidad mayor de aire en las cámaras del robot mejoran el avance, al producir una mayor deformación. En otras palabras, es positivo aumentar la presión de alimentación y el volumen de carga, siempre dentro de los límites de seguridad marcados.

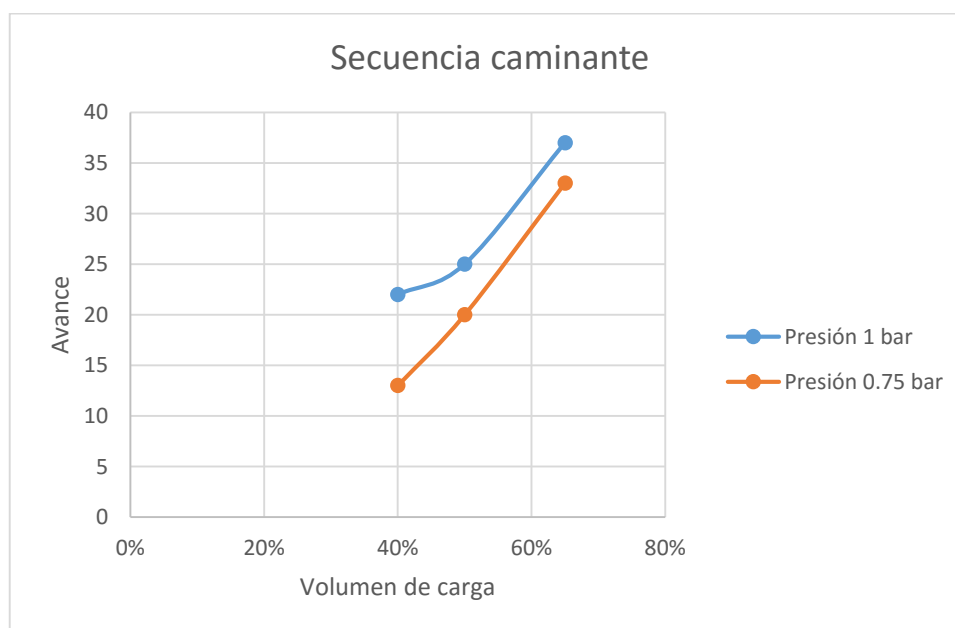


Figura 5-85: Gráfico de resultados de la secuencia caminante.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Puede observarse de nuevo como la relación entre el aumento del volumen de carga y el avance, para una presión determinada, tiende a ser lineal.

6.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Tras llevar a cabo los ensayos expuestos en el resumen anterior de resultados, pueden extraerse diferentes conclusiones sobre las que reflexionar.

En primer lugar, es necesario reseñar la influencia de las condiciones de fricción desiguales en las extremidades para el correcto funcionamiento del robot. El diseño original del mismo tiene ciertas características que impiden, como se ha visto, un avance eficiente con sus secuencias de marcha. Esto se debe, fundamentalmente a:

- Peso del robot: el diseño construido es excesivamente pesado. Por ello, incluso al accionar las extremidades con un volumen de aire que roza los límites de seguridad, el robot no se eleva en vertical una distancia apreciable. Esto hace que, en casos de accionamiento más seguros (esto es, con menor cantidad de aire en su interior), el robot experimente una fricción relevante con la superficie sobre la que avanza, e impide su movimiento efectivo.

La solución a esta problemática pasa, lógicamente por desarrollar un modelo más ligero, realizando una aproximación menos conservadora del diseño. Implica redefinir el estudio por elementos finitos, entre otros aspectos.

- Material de construcción: la silicona empleada tiene, gracias a su capacidad de deformación sobre la superficie de apoyo, y su naturaleza intrínseca, una gran capacidad de contacto con el terreno, produciendo así una mayor huella de contacto, y un rozamiento que es difícil de vencer en ocasiones. Lógicamente, esto penaliza de forma severa el avance.

Si bien puede plantearse la elección de un material diferente como solución, la bibliografía consultada no arroja sustitutivos claros con los que construir el robot, ya que la elección del mismo se basa, fundamentalmente, en aspectos constructivos y de comportamiento mecánico, tales como su deformación. Por ello, la solución al problema del rozamiento propio de la silicona pasa por modificar localmente aquellos puntos conflictivos, disminuyendo su fricción a base de parchear la superficie con materiales de menor coeficiente de rozamiento.

- Geometría del robot: cuando se someten las extremidades delanteras a deformación, su extremo permanece en contacto permanente y estable con la superficie, dificultando así su avance, magnificándose su efecto, de nuevo, por la fricción.

Para solventar este problema, es necesario rediseñar el robot, incluyendo en la actualización mejoras que arreglen el comportamiento de las zonas problemáticas.

Identificada la problemática en su conjunto, la resolución global pasa por los siguientes aspectos:

- Rotura de la simetría del contacto: el fenómeno de alta fricción per se no es perjudicial. De hecho, es necesario mantener dicho grado elevado de fricción entre robot y superficie

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

en las extremidades traseras. De este modo, lo que queda de manifiesto es la necesidad de tener condiciones de rozamiento disimilares entre unas extremidades y otras, permitiendo así el avance global de la estructura. En otras palabras, puede decirse que las extremidades traseras ‘empujan’ al resto del robot, mientras que la cavidad central y las extremidades delanteras oponen la mínima resistencia posible a dicho avance, beneficiándose así de él.

- Modificación de la geometría de las extremidades: los extremos de las extremidades del robot construido finalizan con una zona maciza de silicona. Una disminución de la longitud de dicha zona maciza en las extremidades delanteras beneficia al avance del robot, en la medida en que reduce la zona global de contacto, y de esta forma el rozamiento entre robot y superficie.
- Rediseño del robot: plantear un diseño global más agresivo, menos conservador y más ligero, que haga trabajar los materiales con un mayor grado de sollicitación. En otro términos, un robot más eficiente desde el punto de vista constructivos. Para lograr esto, es necesario llevar a cabo un estudio exhaustivo de los métodos de construcción, y una revisión de las zonas de contacto entre elementos del robot, dotando al mismo de una superficie lo suficientemente grande como para lograr un pegado resistente.

En otro orden de cosas, ha de reseñarse las limitaciones que presenta el diseño actual en las condiciones operativas del robot. Analizando los ensayos, se observa que el rango de variación de la presión de entrada o el volumen de carga se limita a un margen relativamente estrecho. La explicación detrás de esta decisión reside en los siguientes fenómenos:

- Para valores iguales de presión:
 - La reducción del volumen de carga por debajo de un cierto límite conduce a ciclos muy rápidos, en los que el llenado de las cámaras se realiza de manera incompleta, y por lo tanto el avance del robot es prácticamente nulo.
 - El aumento del volumen de carga por encima de un cierto límite conduce a ciclos de llenado lentos, en los que entra una gran cantidad de aire en el robot, pudiéndose llegar al límite de rotura del mismo.
- Para valores iguales de volumen de carga:
 - El aumento de presión por encima de un cierto límite conlleva un aumento del caudal de aire que entra a la cámara, y por tanto de manera global el robot se deforma en mayor magnitud, pudiendo llegar a la rotura.
 - La disminución de la presión por debajo de un cierto límite conlleva una deformación mínima del robot, impidiendo así su avance efectivo.

Esto hace que las condiciones operativas de avance efectivo del robot se sitúen en unos márgenes que se mueven entre:

- 0.75 y 1.25 bares para la presión de alimentación.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- 35 y 65% para el volumen de carga.

Como es lógico, pueden encontrarse combinaciones extremas que llevan a resultados similares a los obtenidos en los ensayos. De este modo, volúmenes de carga muy elevados con presiones de alimentación pequeñas conllevan también un avance efectivo. En el caso opuesto, el empleo de altas presiones de alimentación y volúmenes de carga pequeños no resulta efectivo, ya que la velocidad del ciclo, marcada por el volumen de carga, hace que éste se suceda demasiado rápido.

6.3 IMPACTOS Y RESPONSABILIDAD LEGAL, ÉTICA Y LABORAL

A la hora de evaluar el proyecto en su conjunto, es necesario dedicar un espacio a su análisis de forma transversal, traspasando el plano meramente técnico, y ampliando el horizonte de interés a la dimensión humana, social y de entorno que lo rodea.

Previamente se ha incluido una recopilación de aplicaciones, actuales y potenciales, de los *soft robot*. De entre ellas, destaca por su orientación social el empleo de estos dispositivos en el campo médico.

Una de las principales ventajas de la robótica flexible es la interacción sin riesgos entre usuario y robot, lo que permite su empleo en casi cualquier situación. Llevado al mundo de la medicina, existe la posibilidad de diseñar instrumental que reduzca el riesgo que supone para el paciente el enfrentarse a tratamientos de cirugía complejos que requieran de operadores mecánicos. De este modo, crece la esperanza de vida en cierto tipo de operaciones.

Sin alejarnos del paraguas del campo médico, el empleo de *soft robots* en tratamientos de rehabilitación es una realidad a día de hoy, habiéndose diseñado con éxito exoesqueletos flexibles a base de músculos de McKibben [5], [11]. Esta técnica se vale de la capacidad de deformación del actuador robótico para adaptarse al movimiento del paciente, a la vez que ejecuta por él parte de la fuerza necesaria para poner en funcionamiento sus músculos.

Este tipo de dispositivos cuenta además con la ventaja de ser más ligeros que los actuadores rígidos, con lo que es posible pensar que en pocos años puedan sustituirse o automatizarse cierto tipo de terapias para el bien del paciente, que dispondrá de un tratamiento rápido, económico, y en cualquier sitio.

Llevado a sus últimas consecuencias, el empleo de exoesqueletos a base de actuadores flexibles puede permitir la locomoción a personas con problemas motrices, tales como la paraplejia, tetraplejia, y otro tipo de complicaciones neuromusculares.

Sin embargo, el uso de exoesqueletos no se concentra de forma exclusiva en el ámbito de la terapia: un diseño adecuado puede permitir a un ser humano con excelente motricidad llevar a cabo esfuerzos mayores de los que su cuerpo le permite, complementando así el funcionamiento del mismo.

Esta concepción del *soft robot*, y la plausibilidad de su aplicación por encima de la de los sistemas rígidos, marca en cierto modo las aplicaciones profesionales de estos dispositivos a corto plazo. Existen un gran número de trabajos para los cuales aún no se ha desarrollado un robot sustitutivo del obrero cualificado, bien por motivos de coste, o porque la definición de la tarea requiere de una maestría o unas propiedades imposibles de replicar mediante un robot.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sin embargo, cuando entra en escena la robótica flexible, trae consigo los actuadores de tipo exoesqueleto citados anteriormente, y permite aportar una solución intermedia y efectiva para el tipo de tareas descritas: el uso de complementos robóticos al trabajo del operario, gracias a los cuales pueda desarrollar sus tareas de forma más rápida y precisa supone un incremento de productividad, con unos costes incluso menores que los de la implantación de un robot tradicional, dadas las características de los actuadores flexibles.

Además, resuelve de forma elegante uno de los compromisos éticos que se relacionan de forma íntima con el mundo robótico [29]: la sustitución del operario humano por una máquina, contribuyendo así a la destrucción de puestos de trabajo. Algunos datos muestran que casi la mitad de empleos destruidos durante la crisis económica de los últimos años, se han sustituido por aplicaciones automatizadas.

La robótica flexible propone, a corto plazo, una solución como la descrita, que complemente la labor del operario sin su sustitución.

En otro orden de cosas, siempre que se analiza la dimensión ética y legal de la robótica, se llevan a cabo análisis sobre el modo de operación de los robots, su seguridad, y el reparto de responsabilidades en caso de accidente. Una parte de los problemas de este tipo proviene de fallos de control del robot, en los que no es capaz de resolver con destreza una determinada situación.

La solución más común de control de los robots tradicionales a día de hoy pasa por mecanismos de bucle cerrado, más seguros, pero en los que todavía se pueden dar situaciones que lleven al descontrol del procesamiento de datos, con el correspondiente fallo de seguridad.

En la actualidad, todavía no se han desarrollado aplicaciones de *soft robots* capaces de operar en bucle cerrado, pero incluso en el caso de desarrollarse, y darse una hipotética situación de compromiso de seguridad, de nuevo sus características de interacción con el usuario resolverían el problema, gracias a la posibilidad de absorber energía del propio robot.

Para concluir la reflexión, merece la pena destacar que la técnica de la robótica flexible está aún en una fase muy primitiva de su desarrollo, y que en los años venideros será un campo que sufra grandes cambios y avances. Aun así, las pocas aplicaciones que hoy en día se han desarrollado de manera efectiva, muestran su potencialidad, y hacen entrever que posiblemente se haya producido un punto de inflexión en la concepción robótica que hasta día de hoy se tenía. El impacto sobre el modelo productivo basado en la automatización de tareas puede suponer una revolución del mismo, alterando las técnicas de fabricación, implementación y operación de los robots, cambiando así parte de la economía a escala global.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El campo de la robótica flexible se encuentra en constante desarrollo y mejora. Sus aplicaciones actuales se limitan a casos teóricos de estudio, y el desarrollo de pequeños prototipos como labor de ingeniería, que permita pulir y hacer crecer este campo aún en sus primeros pasos.

Lo que se ha demostrado con este proyecto es que, partiendo de unas herramientas relativamente básicas, o de fácil adquisición, se ha conseguido diseñar, construir y accionar un robot completamente funcional, y que cumple los objetivos para los que fue diseñado: es capaz de avanzar en una determinada dirección de manera efectiva.

La falta de información previa sobre el tema, con una bibliografía aún escasa y de gran complejidad técnica, dificulta la labor, pero al mismo tiempo enriquece el proceso de aprendizaje en el desarrollo del proyecto: muchos detalles, posibles mejoras y errores del diseño inicial sólo se encuentran a lo largo de la construcción y el accionamiento del robot. La identificación de los mismos, y su posterior subsanación provee un ámbito provechoso en términos de progresión.

Tras la realización del trabajo, se ha recorrido parte de la curva de aprendizaje asociada al empleo de esta tecnología. Sin embargo, aún se dista de controlar o dominar la técnica, y de hecho se ha hecho patente durante el análisis de los resultados las posibles mejoras o variaciones que sería conveniente implementar en futuras construcciones.

Entre los aspectos relevantes a mejorar, se encuentra el rediseño del modelo de robot, buscando un cuerpo más ligero, y más fácil de fabricar. Esto pasa por rediseñar en primer lugar las superficies de contacto para el pegado del robot, que son las zonas débiles del mismo frente al inflado de las vejigas, y por llevar al límite los espesores de los materiales en aquellas zonas que lo permitan. De este modo, se produciría un ahorro significativo del peso del robot, y se mejoraría la eficacia de su aplicación.

Aun así, el diseño analizado muestra indicios de la potencialidad de la técnica de la robótica flexible: es capaz de ejecutar diferentes secuencias de marcha, y avanzar de forma efectiva. Una de las claves para ese avance reside en la asimetría de las condiciones de rozamiento que se fuerzan en el robot. Para mejorar drásticamente el resultado de la actuación con unas determinadas características de presión y volumen de carga, es necesario reducir la fricción de las extremidades delanteras del robot con la superficie de contacto, manteniendo la fricción original de la silicona en las traseras. De este modo, las extremidades delanteras se aprovechan del empuje de las traseras y la elevación del cuerpo intermedio, ganando una mayor distancia de avance en cada ciclo.

Más allá del caso concreto del robot del proyecto, lo cierto es que es el campo de la robótica flexible tiene un gran potencial que en los próximos años se verá reflejado en nuevas y más prometedoras aplicaciones. Entre ellas, los ámbitos con más posibilidades a día de hoy de desarrollar *soft robots* a corto plazo y con aplicaciones de gran utilidad son la biomecánica y la fisioterapia.

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Se han desarrollado exoesqueletos que facilitan y mejoran la locomoción humana, dotándola de mayor potencia motriz. Entre las ventajas, evidentes, que mejoran la implementación con respecto a una solución rígida se encuentra la posibilidad de adaptabilidad al cuerpo del paciente, siendo más ‘*userfriendly*’, que es el término que emplea la literatura inglesa para referirse a la facilidad de interacción entre el robot flexible y el usuario, reduciéndose parte de los riesgos que representan los robots convencionales en términos de seguridad.

Otra de las aplicaciones con gran futuro, y en las que a día de hoy ya se han implementado soluciones con éxito son los elementos de agarre y manipulación de instrumentos, sustituyendo a las pinzas o las ventosas de efecto Venturi que hasta hoy se han usado con tal fin.

Entre las futuras líneas de investigación y desarrollo del campo de la robótica flexible, la bibliografía consultada muestra con un mayor detalle de definición tres ámbitos:

- Códigos de programación ‘genéticos’ [1], con los que refinar el diseño de los *soft robot*. El modo de operación de este tipo de códigos establece una analogía con la evolución de los organismos naturales, en los que las alteraciones y mutaciones del código genético son evaluadas por el propio ecosistema en el que vive el organismo, incorporándose y transmitiéndose a futuras generaciones si tienen éxito.

Para intentar replicar el mecanismo de evolución natural, se parte de unas ciertas herramientas, tales como librerías de materiales, y diferentes entornos. Con ellos, el código ‘genético’ virtual genera de forma aleatoria diferentes caminos evolutivos del robot, variando sus dimensiones, morfología y caracterización (materiales y combinación de los mismos). Para evaluar los diferentes diseños, se establecen parámetros de ponderación muy variados, tales como el avance del robot, su velocidad, obtención de unos ciertos requisitos de peso o volumen, etc. En función de lo bien o mal que el diseño cumpla con la ponderación, éste se valida y pasa a la cadena evolutiva. En caso contrario, se considera como una mutación ‘poco útil’, y se descarta.

La relevancia detrás de esta técnica, y donde reside su potencial, es la posibilidad de automatizar el diseño, al mismo tiempo en el que éste se mejora por sí mismo. Esto permite encontrar formas o mecanismos de locomoción ‘creativos’, que a priori son poco o nada inmediatos de deducir.

- Mecanismos de control del robot en bucle cerrado [2], con los que se permita incrementar de manera radical la precisión de funcionamiento de este tipo de dispositivos. A día de hoy, el control con realimentación de los *soft robot* presenta un cierto número de problemas a los que dar solución. Entre ellos, la instalación de los sensores suele ser el aspecto de mayor compromiso.

Debido a que hasta la fecha la gran parte de la sensorización diseñada para aplicaciones robóticas surge de necesidades de control para cuerpos y actuadores de carácter rígido, sus características las hacen poco viables para su empleo en robots flexibles. En otras palabras, el diseño de los captadores actuales no tiene en cuenta el modo de

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

funcionamiento que emplean los *soft robot*, en el cual la gran deformación que experimentan suele ser la razón principal que impide su implementación.

Como respuesta al problema, ya se ha iniciado el estudio de sistemas de monitorización externos al robot, en los que a través de métodos de captura de imagen se consigue conocer su estado. Sin embargo, éstas técnicas son costosas en términos económicos, al tiempo que complejas de poner en marcha y ser efectivas. Una de las máximas detrás de la filosofía del *soft robot* es la posibilidad de diseñar una máquina que dependa de los mínimos recursos posibles, para poder desplazarse de forma libre por su entorno. Esto limita, como es lógico, la aplicación de los sistemas descritos, ya que han de instalarse sobre una determinada estación, y su rango de ‘visión’ es limitado.

Por ello, el campo de la sensorización flexible es el otro de los grandes caminos que esta tecnología tiene que recorrer para encontrar las respuestas adecuadas a los problemas que plantea.

- Tecnología de materiales, que permita conseguir actuadores con propiedades mejores que las actuales. A día de hoy ya se ha comenzado la experimentación [5], [11] de *soft robots* contruidos a base de materiales con propiedades cambiantes, resolviendo así una de los problemas que a día de hoy presenta la robótica flexible: la capacidad de carga de los dispositivos fabricados suele ser pequeña debido a los materiales de construcción. La flexibilidad y elasticidad que permiten las grandes y complejas deformaciones se tornan en inconvenientes razonables cuando se intenta operar el robot sometiéndolo a cargas de cierta magnitud, frente a las cuales, termina por ceder.

Es por ello, por lo que existe un gran interés en el desarrollo de materiales con propiedades cambiantes, que permitan alternar entre un estado ‘flexible’ que permita la deformación deseada, y un estado ‘rígido’ que consiga soportar las solicitaciones necesarias.

Los primeros resultados al respecto se han obtenido con un cierto tipo de ceras, en las que variaciones controladas de temperatura consiguen efectuar la transición citada entre estado flexible y rígido. Sin embargo, esta tecnología depende del suministro eléctrico que aportan los conductores de cobre que se introducen en la estructura de cera, para provocar el cambio de temperatura.

El camino que este desarrollo debe tomar en el futuro es el de diseñar materiales autónomos y regulables, que permitan efectuar una transición prácticamente continua entre los dos estados citados con antelación.

En definitiva, desde hace aproximadamente un lustro, la comunidad científica se encuentra frente a una revolución de la robótica tradicional, que amenaza con redefinir las bases de un gran número de aplicaciones. Tendrá que superar algunos de los problemas que aún presenta, sobre todo en términos de control y regulación, pero los estudios arrojan cada vez resultados más positivos y grandes avances en ese sentido, por lo que es plausible pensar en el uso e implementación de los *soft robot* a corto plazo.

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

8. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

El proyecto se lleva a cabo en 10 meses, período que va desde octubre de 2014 hasta julio de 2015. Para ello, ha sido preciso llevar a cabo una serie de tareas que, puestas en común, componen el proyecto como tal.

La primera fase se corresponde a la determinación del proyecto y la definición de objetivos. Comienza igualmente la labor de búsqueda y estudio de bibliografía e información de temas relacionados con el proyecto, como pueden ser: el estado del arte de la robótica flexible, diseños y soluciones existentes para diferentes tipos de actuadores, conceptos sobre el control de robots, simuladores de entorno físico, o métodos de construcción, entre otros. De igual forma se lleva a cabo el aprendizaje de ciertos softwares y aplicaciones informáticas de interés para el desarrollo del proyecto.

Paralelamente a la fase de formación, comienza el estudio de los aspectos constructivos del robot, llevando a cabo diferentes diseños y simulaciones empleando el método de los elementos finitos para ello. Gracias ello se consigue entender la forma en la que el diseño y la geometría del robot permiten variar el modo de deformación cuando se actúa sobre él. Se obtiene de este modo un diseño inicial de robot, y se inicia el diseño y la impresión de los moldes para su fabricación.

En paralelo con el estudio de los elementos finitos se inicia la búsqueda de información sobre la instalación electro-neumática, y se procede al diseño de la misma, decidiendo los componentes y su montaje.

La parte intermedia del proyecto se basa en la construcción y montaje de todos los elementos: robot, instalación de soporte, módulos de potencia eléctrica y neumática, etc. Al mismo tiempo se diseña el sistema de control en Matlab, así como la interfaz gráfica de usuario. El montaje se hace progresivamente, instalando y testando los diferentes módulos por separado, antes de verificar el funcionamiento global del sistema.

La última parte del proyecto consiste en la puesta en marcha de toda la instalación, y su uso nominal para la toma de medidas y realizar los ensayos pertinentes. Es además en esta última parte cuando se inicia la redacción del proyecto.

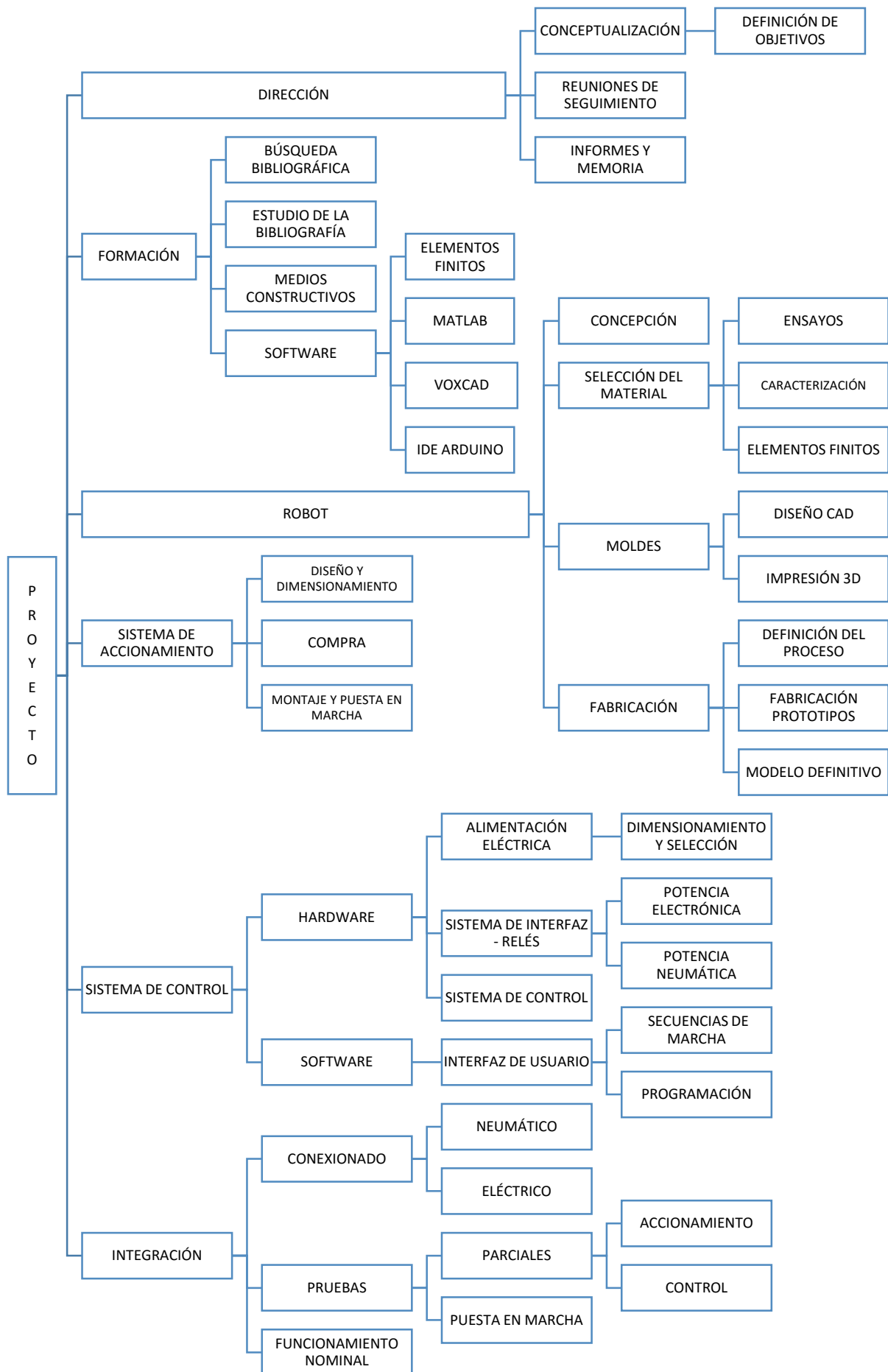
Es necesario comentar que la dedicación diaria empleada en el proyecto varía en función de la época de trabajo. Las primeras etapas se compaginan con la actividad lectiva y se invierte en ellas, por tanto, menos horas diarias que en etapas más tardías, en las que la dedicación lectiva es menor, y pueden emplearse más horas al proyecto. De ahí que ciertas actividades, como los elementos finitos, lleven tantos días en la descomposición temporal: se engloban dentro de la primera etapa.

8.1 ESTRUCTURA DE DESCOMPOSICIÓN DEL PROYECTO (EDP)

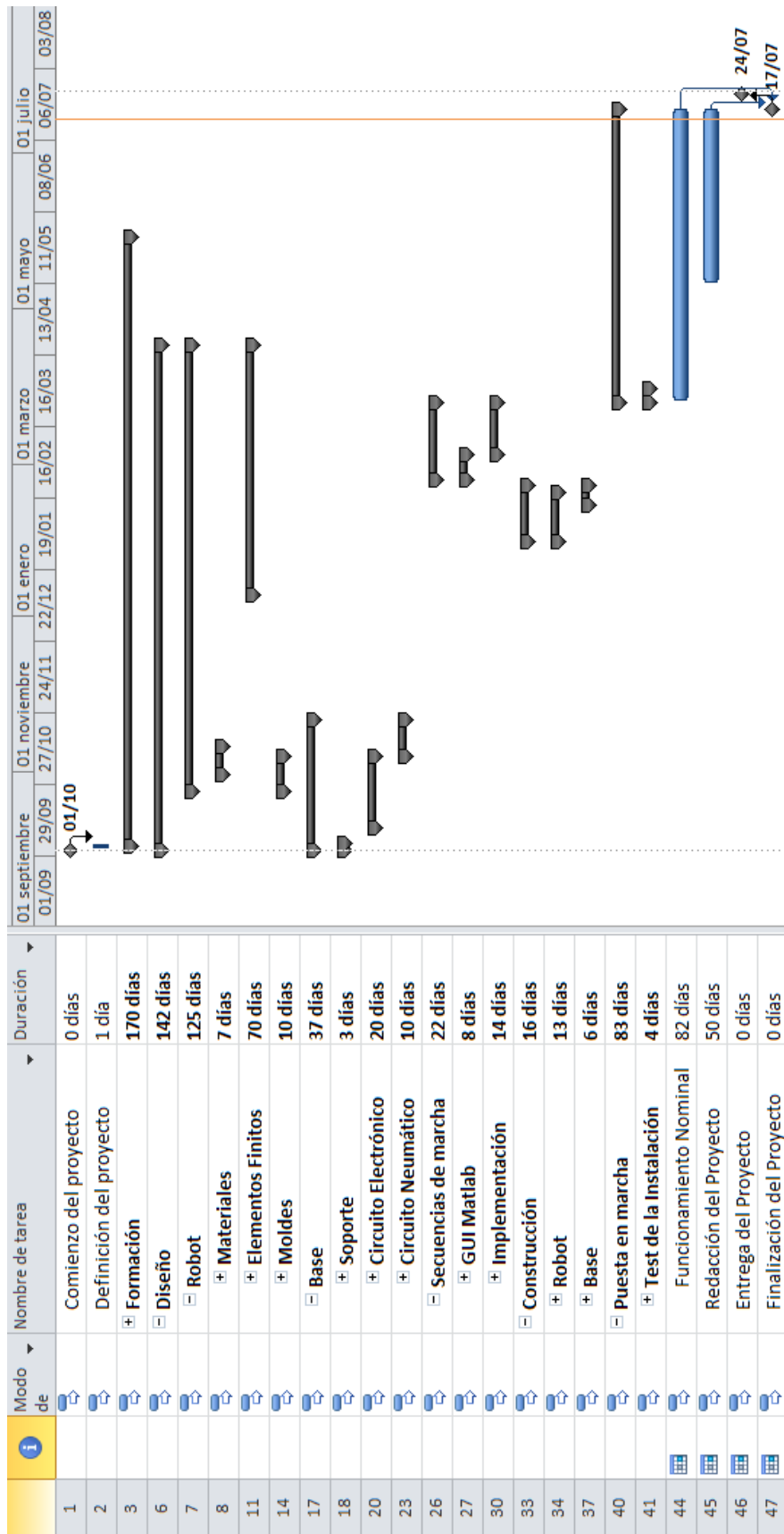
La estructura de descomposición del proyecto recoge en un mismo esquema todas las tareas que han sido precisas llevar a cabo para completar el proyecto.

Se organiza la información en base a diferentes subsistemas de trabajo, que engloban tareas encaminadas a objetivos comunes.

8. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO



8.2 DIAGRAMA DE GANTT



8. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

8.3 PRESUPUESTO

A continuación se muestra la estimación de presupuesto del proyecto. Se hace notar que las horas de trabajo empleadas se valoran en base al cobro por una beca de colaboración.

| Partida | Concepto | Unidades | Precio unidad (€) | Importe |
|--------------|-----------------------------------|----------|-------------------|-------------------|
| 1 | Bibliografía | | | |
| | Artículos de libre acceso | 28 | 0,00 | 0,00 |
| | Lectura de documentos | 60 | 8,00 | 480,00 |
| 2 | Robot | | | |
| 2.1 | Material | | | |
| | Silicona EcoFlex® Supersoft 00-30 | 2 | 32,70 | 65,40 |
| | Caracterización | 4 | 8,00 | 32,00 |
| | Análisis elementos finitos | 2 | 8,00 | 16,00 |
| 2.2 | Moldes | | | 0,00 |
| | ABS 3mm | 1 | 16,95 | 16,95 |
| 2.3 | Fabricación | | | |
| | Mano de obra | 20 | 8,00 | 160,00 |
| 3 | Sistema de Accionamiento | | | |
| 3.1 | Estación | | | |
| | Madera | 1 | 14,95 | 14,95 |
| | Metacrilato | 1 | 8,50 | 8,50 |
| | Tornillos | 1 | 2,50 | 2,50 |
| 3.2 | Sistema Neumático | | | |
| | Electroválvula - SY114-6G-Q | 6 | 21,68 | 130,08 |
| | Placa base - SS3Y1-S41-06-M5-Q | 1 | 30,45 | 30,45 |
| | Racor - KQ2L04-M5A | 10 | 2,28 | 22,80 |
| | Regulador serie - AR20-F01BG-A | 1 | 21,10 | 21,10 |
| | Racor - KQ2H04-01AS | 10 | 1,14 | 11,40 |
| | Regulador en línea - AS2001FG-04 | 1 | 8,10 | 8,10 |
| | Tubo de poliuretano - TUS0425W-20 | 1 | 15,92 | 15,92 |
| | Manómetro - GA33-10-01 | 1 | 8,52 | 8,52 |
| | Racor - KQ2H06-01AS | 10 | 1,31 | 13,10 |
| | Unión tubo-tubo - KQ2H04-OOA | 10 | 1,24 | 12,40 |
| | Racor instantáneo - KQ2F04-01A | 10 | 2,15 | 21,50 |
| | Racor en T - KQ2T04-OOA | 10 | 2,00 | 20,00 |
| 3.3 | Sistema electrónico | | | |
| | Fuente de alimentación 100W | 1 | 11,37 | 11,37 |
| | Arduino Mega 2560 R3 | 1 | 12,29 | 12,29 |
| | Cableado | 1 | 3,47 | 3,47 |
| 3.4 | Fabricación | | | |
| | Mano de obra | 25 | 8,00 | 200,00 |
| 4 | Ensayos | | | |
| | Mano de obra | 10 | 8,00 | 80,00 |
| 5 | Memoria TFG | | | |
| | Redacción | 100 | 8,00 | 800,00 |
| TOTAL | | | | € 2.218,80 |

9. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Cheney, N., MacCurdy, R., Clune, J., Lipson, H. (2013) Unshackling Evolution: Evolving Soft Robots with Multiple Materials and a Powerful Generative Encoding
- [2] Ming, A., Hashimoto, K., Zhao, W., Shimojo, M. (2013) Fundamental Analysis for Design and Control of Soft Fish Robots using Piezoelectric Fiber Composite
- [3] Rieffel, J., Knox, D., Smith, S., Trimmer, B. (2013) Growing and Evolving Soft Robots
- [4] Seok, S., Onal, C., Wood, R., Rus, D., Kim, S. (2010) Persaltic locomotion with antagonistic actuators in soft robotics
- [5] Trivedi, D., Rahn, C., Kier, W., Walker, I. (2008) Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research
- [6] Trimmer, B., Lin, H., Baryshyan, A., Leisk, G., Kaplan, D. (2012) Towards a biomorphic soft robot: design constraints and solutions
- [7] Shepherd, R., Ilievski, F., Choi, W., Morin, S., Stokes, A., Mazzeo, A., Chen, X., Wang, M., Whitesides, G. (2011) Multigait soft robot
- [8] Pfeifer, R., Gravato Marques, H., Iida, F. (2012) Soft Robotics: The Next Generation of Intelligent Machines
- [9] Kim, S., Laschi, C., Trimmer, B. (2013) Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics
- [10] Duriez, C. (2013) Control of Elastic Soft Robots based on Real-Time Finite Element Method
- [11] Cho, K. (2015) Soft Robotics for Natural and Adaptive Motion Generation
- [12] Umedachi, T., Vikas, V., Trimmer, B. (2013) Highly Deformable 3-D Printed Soft Robot Generating Inching and Crawling Locomotions with Variable Friction Legs
- [13] Blanco, D., Al Ansari, S., Castejón, C., López Boada, B., Moreno, L. (2005) Manfred: Robot antropomórfico de servicio fiable y seguro para operar en entornos humanos
- [14] Hannan, M., Walker, I. (2003) Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots
- [15] Lachi, C., Cianchetti, M., Mazzolai, B., Margheri, L., Follador, M., Dario, P. (2012) Soft robot arm inspired by the octopus
- [16] Lin, H., Leis, G., Trimmer, B. (2011) Goqbot: a Caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot.
- [17] Dorfmann, A., Trimmer, B., Woods W. (2007) A constitutive model for muscle properties in a soft-bodied arthropod.
- [18] Yim, J-G., Sung Yeon, J., Hyeon Park, J., Lee, S-H., Hur, J-S. (2007) Robust Control using Recursive Design Method for Flexible Joint Robot Manipulator.

9. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [19] Tao, Y., Wang, T., Wang Y., Guo, L., Xiong, H., Chen, F. (2014) Design and modeling of a new variable stiffness robot joint.
- [20] Swensen, J., Dollar, A. (2014) Optimization of Parallel Spring Antagonists for Nitinol Shape Memory Alloy Actuators.
- [21] Reilly, S., Stubblebine, M., Supowit, J., Catton, I. (2013) A novel, autonomous thermal connector.
- [22] Koh, J-S., Cho, K-J. (2009) Omegabot : Biomimetic inchworm robot using SMA coil actuator and smart composite microstructures (SCM).
- [23] Valdivia y Alvarado, P., Youcef-Toumi, K. (2006) Design of Machines with Compliant Bodies for Biomimetic Locomotion in Liquid Environments.
- [24] Ouanezar, S., Jean, F., Tondu, B., Maier, M., Darlot, C., Eskiizmirliler S. (2011) Biologically inspired sensory motor control of a 2-link robotic arm actuated by McKibben muscles.
- [25] Neppalli, S., Jones, B., McMahan, W., Chitrakaran, V., Walker, I., Pritts, M., Csencsits, M., Rahn, C., Grissom, M. (2007). OctArm - A soft robotic manipulator.
- [26] Yang, L., Xiaojing, L., Yanping, Z. (2012) State of the Art in Finite Element Analysis Technology.
- [27] el Moctar, B. (2008) State-of-the-Art CFD Simulation for Ship Design.
- [28] Hiller, J., Lipson, H. (2011-2015) Tutorials [Online]. Disponible en <http://www.voxcad.com/tutorials>
- [29] Tremosa, L. (2014) ¿Qué hacemos ahora con los carteros? [Online]. Disponible en http://www.automaticaeinstrumentacion.com/es/notices/2014/07/-que-hacemos-ahora-con-los-carteros-42363.php#.Va60_fntmkp

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 0-1: Robot completo, incluyendo la estación para su funcionamiento. | iv |
| Figura 0-2: Robot durante su fase de construcción. | v |
| Figura 0-3: Estación de funcionamiento. | vii |
| Figura 1-4: La figura muestra el grado de relación del sistema y su entorno. A la izquierda, los algoritmos y ordenadores tienen una mínima dependencia de su entorno físico, mientras que hacia la derecha, los sistemas más blandos necesitan de dicha interacción [8]. | 1 |
| Figura 1-5: Ejemplos de inspiración biológica: (a) estrella de mar, (b) pulpo, (c) anémona colonial, (d) lengua de mamífero, (e) calamar, (f) trompa de elefante, (g) equinoidea, (h) <i>Illex illecebrosus</i> , (i) gusano, (j) caracol [5]. | 2 |
| Figura 1-6: Robot caminante de tipo FEA pasando através de una pequeña abertura [11]. | 4 |
| Figura 2-7: Variación en la complejidad de la posición final de un robot para alcanzar un mismo punto, en función del número de cuerpos que lo integran. | 7 |
| Figura 2-8: Posibilidades de los robots rígidos y flexibles: (a) destreza, (b) detección de posición, (c) manipulación y (d) carga. | 8 |
| Figura 2-9: Soft robot accionado a través de cables de nitinol de tipo SMA [9]. | 10 |
| Figura 2-10: Soft robot accionado a través de cableado interno, embebido en una estructura de silicona [5]. | 11 |
| Figura 2-11: Actuador flexible OctArm construido empleando actuadores de tipo McKibben [25]. | 11 |
| Figura 2-12: Soft robot de tipo FEA inspirado en el comportamiento de un pez, y que actúa en medio acuático a través de aire a presión [2]. | 12 |
| Figura 2-13: Proyecto Roboy [8], en el que se construyó un humanoide de inspiración biológica movido por tendones flexibles. Como aditivo romántico al proyecto, se estructuró en 9 meses, al igual que la gestación humana. | 14 |
| Figura 2-14: Análisis por elementos finitos de un actuador tipo FEA. | 15 |
| Figura 2-15: Imagen de un análisis CFD de un software comercial. | 16 |
| Figura 2-16: Modelización y comportamiento de un cuerpo de naturaleza blanda analizado con el software NVidia PhysX [3]. | 17 |
| Figura 2-17: Diferentes diseños de cuerpos flexibles diseñados y analizados empleando VoxCAD [1]. | 17 |
| Figura 2-18: Esquema de la organización global de los tipos de robots existentes, en función de sus materiales, deformación, y grados de redundancia [5]. | 20 |
| Figura 2-19: Exoesqueleto construido a base de músculos de McKibben, que facilita la rehabilitación en pacientes con dificultad para caminar [11]. | 22 |
| Figura 2-20: Robot FEA de tipo 'gripper', capaz de adaptarse a la forma de un objeto, y ejercer la presión suficiente para elevarlo [11]. | 22 |
| Figura 2-21: Soft robot de tipo FEA, cuadrúpedo, capaz de ejecutar diferentes secuencias de marcha [11]. | 23 |
| Figura 3-22: Silicona de catalización aluminica Smooth-ON® Ecoflex 00-30. | 27 |
| Figura 3-23: Impresora 3D Prusa 2, empleada para la impresión de los moldes. | 28 |
| Figura 3-24: Arduino Mega 2560 R3, usado como microcontrolador. | 29 |
| Figura 3-25: Módulo de 8 relés para accionamiento a través de Arduino. | 30 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3-26: Esquema de la instalación neumática empleada para el accionamiento del robot. | 31 |
| Figura 3-27: Electroválvula (A) y regulador de presión con manómetro incorporado (B), elementos del circuito neumático construido. | 31 |
| Figura 3-28: Esquema de la estación base sobre la que se montan los circuitos de potencia electrónica y neumática, construida en madera y metacrilato. | 32 |
| Figura 3-29: Placa de montaje. | 33 |
| Figura 4-30: Montaje para el ensayo de tracción de la silicona de construcción. | 36 |
| Figura 4-31: Gráfico de resultados del ensayo de tracción. | 37 |
| Figura 4-32: Montaje para el ensayo de tracción de la silicona de construcción. | 38 |
| Figura 4-33: Gráfico de resultados del ensayo de compresión. | 39 |
| Figura 4-34: Secuencia de avance de la extremidad del cuadrúpedo. | 40 |
| Figura 4-35: Sección ensayada en la etapa 1. | 42 |
| Figura 4-36: Modelo en reposo de la etapa 1. | 42 |
| Figura 4-37: Resultado de la simulación de la etapa 1. | 43 |
| Figura 4-38: Resultado de la simulación de la etapa 1. | 43 |
| Figura 4-39: Resultado de la simulación de la etapa 2. | 44 |
| Figura 4-40: Resultado de la simulación de la etapa 3. | 45 |
| Figura 4-41: Resultado de la simulación de la etapa 3. | 45 |
| Figura 4-42: Resultado de la simulación de la etapa 4. | 46 |
| Figura 4-43: Diseño ensayado en la etapa 5. | 46 |
| Figura 4-44: Resultado de la simulación de la etapa 5. | 47 |
| Figura 4-45: Resultado de la simulación de la etapa 5. | 47 |
| Figura 4-46: Resultado de la simulación de la etapa 6. | 48 |
| Figura 4-47: Resultado de la simulación de la etapa 7. | 48 |
| Figura 48: Diseño del modelo ensayado durante la etapa 8. | 49 |
| Figura 49: Resultado de la simulación de la etapa 8. | 49 |
| Figura 4-50: Resultado de la simulación de la etapa 8. | 50 |
| Figura 4-51: Diseño ensayado en VoxCAD para el ajuste de los parámetros de la simulación. | 52 |
| Figura 4-52: Deformaciones experimentadas por el modelo ensayado en función del incremento de temperatura, T. | 53 |
| Figura 4-53: Avance del modelo ensayado en función del incremento de temperatura, T. | 54 |
| Figura 4-54: Gráfico de resultados de la simulación. | 55 |
| Figura 4-55: Gráfico de resultados de la simulación. | 55 |
| Figura 4-56: Deformaciones experimentadas por el modelo en función del coeficiente de fricción entre él y la superficie de avance. | 56 |
| Figura 4-57: Gráfico de resultados de la simulación. | 57 |
| Figura 4-58: Gráfico de resultados de la simulación. | 57 |
| Figura 4-59: Modelo de caminante cuadrúpedo empleado en la simulación. | 58 |
| Figura 4-60: Gráfico de resultados de la simulación. | 59 |
| Figura 4-61: Modelo de robot cuadrúpedo. | 60 |
| Figura 4-62: Molde superior. | 60 |
| Figura 4-63: Molde inferior. | 61 |
| Figura 4-64: Construcción y deformación del robot cuadrúpedo [11]. | 61 |
| Figura 4-65: Parte superior del robot, lista para ser pegada. | 62 |
| Figura 66: Etapa 3 de fabricación. | 63 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 67: Esquema de la estación de control..... | 65 |
| Figura 5-68: Diagrama de comunicación entre los elementos de la estación de montaje..... | 65 |
| Figura 5-69: Numeración de las cámaras del robot cuadrúpedo..... | 67 |
| Figura 5-70: Interfaz de control del robot..... | 68 |
| Figura 5-71: Secuencia Test..... | 69 |
| Figura 5-72: Secuencia Ondulante..... | 70 |
| Figura 5-73: Secuencia Ondulante (Fases)..... | 70 |
| Figura 5-74: Secuencia Ondulante, Fase A..... | 71 |
| Figura 5-75: Secuencia Ondulante, Fase B..... | 71 |
| Figura 5-76: Secuencia Ondulante, Fase C..... | 71 |
| Figura 5-77: Secuencia Ondulante, Fase D..... | 72 |
| Figura 5-78: Secuencia Ondulante, Fase E..... | 72 |
| Figura 5-79: Secuencia Caminante..... | 73 |
| Figura 5-80: Variación sobre la secuencia caminante..... | 74 |
| Figura 5-81: Accionamiento de las cámaras 1, 3 y 5..... | 74 |
| Figura 5-82: Accionamiento de las cámaras 2, 3 y 4..... | 75 |
| Figura 5-83: Instalación para el ensayo del robot, que incluye el PC (A), el compresor neumático (B), la estación base (C), el robot (D) y la escala métrica (E)..... | 77 |
| Figura 5-84: Gráfico de resultados de la secuencia caminante..... | 80 |
| Figura 5-85: Gráfico de resultados de la secuencia caminante..... | 81 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2-1: de propiedades y características de diferentes tipos de robot, en función de sus materiales de construcción y mecanismos de deformación [5]. | 19 |
| Tabla 4-2: Resultados del ensayo de tracción | 37 |
| Tabla 4-3: Resultados del ensayo de compresión. | 38 |
| Tabla 4-4: Caracterización del material silicona. | 40 |
| Tabla 4-5: Resultados de la simulación. | 54 |
| Tabla 6: Resultados de la simulación. | 56 |
| Tabla 4-7: Resultados de la simulación. | 58 |
| Tabla 4-8: Resultados de la simulación. | 59 |
| Tabla 5-9: Ensayo con fricción elevada. | 79 |
| Tabla 5-10: Ensayo con fricción reducida en las extremidades delanteras, para la secuencia ondulante. | 79 |
| Tabla 6-11: Resultados del ensayo con la secuencia caminante. | 81 |

ANEXO

Cualquier proyecto de ingeniería es susceptible de ser revisado, vuelto a plantear y mejorado. Con ese espíritu crítico que debe tener por bandera la buena práctica de la ingeniería, tras la finalización de la memoria correspondiente al trabajo desarrollado, y la entrega de la misma, se decide emprender una iteración de mejora sobre el resultado final, aprendiendo de los resultados y los problemas identificados para diseñar un dispositivo más eficiente en su locomoción.

Se recuerda que el proyecto tenía por objetivo la construcción y el control de un *soft robot* caminante cuadrúpedo, de accionamiento neumático, capaz de ejecutar diferentes secuencias de marcha para avanzar sobre una superficie plana.

La consecución de dichos objetivos implica una secuencia de fases que engloban, entre otras:

- Recopilación de información sobre el tema en cuestión.
- Diseño y fabricación del robot (englobando la elaboración de ensayos necesarios para caracterizar los materiales, entre otros).
- Diseño y fabricación de la estación de control del robot (potencia neumática y eléctrica).
- Diseño del control por ordenador (secuencias de marcha).
- Ensayos, análisis y resultados.

Completadas las fases del proyecto, y tras realizar un análisis del comportamiento y la efectividad del robot diseñado a lo largo del proyecto, se comprueba que, si bien cumple con los objetivos iniciales fijados al comienzo del mismo, tras la experiencia se identifican mejoras abordables. Su operación se ve limitado por una serie de factores constructivos y de ejecución, que se identifican como los siguientes:

- Peso del robot: el robot construido es demasiado pesado, motivo por el cual eleva de forma insuficiente su estructura del suelo. Eso le provoca una fuerza de rozamiento que limita su movimiento, al no ser capaz de desplazarse por la superficie de avance.
- Material de construcción: la silicona empleada influye como es lógico en el fenómeno de fricción. Se trata de un material que se adapta bien a la superficie de contacto, y con un coeficiente de fricción elevado cuando interacciona con la mayoría de materiales.
- Geometría del robot: en conjunto con la fricción, la existencia de zonas ‘macizas’, en las que no se produce deformación dificulta la locomoción, al quedarse estas ancladas a la superficie de contacto. Se impide así el movimiento del resto de la estructura, que vuelve a su posición de reposo.

Teniendo en cuenta este listado de problemas identificados en el diseño original, se procede a la iteración de mejora del mismo. Para ello, las propuestas de mejora que se habían recopilado en el texto se transcriben en acciones concretas que llevar a cabo.

CAMBIOS EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Un primer grupo de medidas se toman en relación al diseño y la fabricación del robot, introduciendo importantes alteraciones sobre el prototipo original. Entre ellas, se pueden identificar las siguientes:

- A) Reducción del peso del conjunto. Se identifica como una medida necesaria para la mejora de la eficiencia del dispositivo. Para conseguirlo, se toman las siguientes consideraciones, gracias a las cuales el peso del conjunto se reduce en casi un 60%.
 - Aumento del número de ramificaciones internas: de este modo, se reduce la cantidad de material empleada en la construcción del modelo, y por tanto se reduce su peso.

Si se ejecuta un corte por la sección media del modelo, el total de área dedicada a las cavidades aumenta del 37% al 58%.

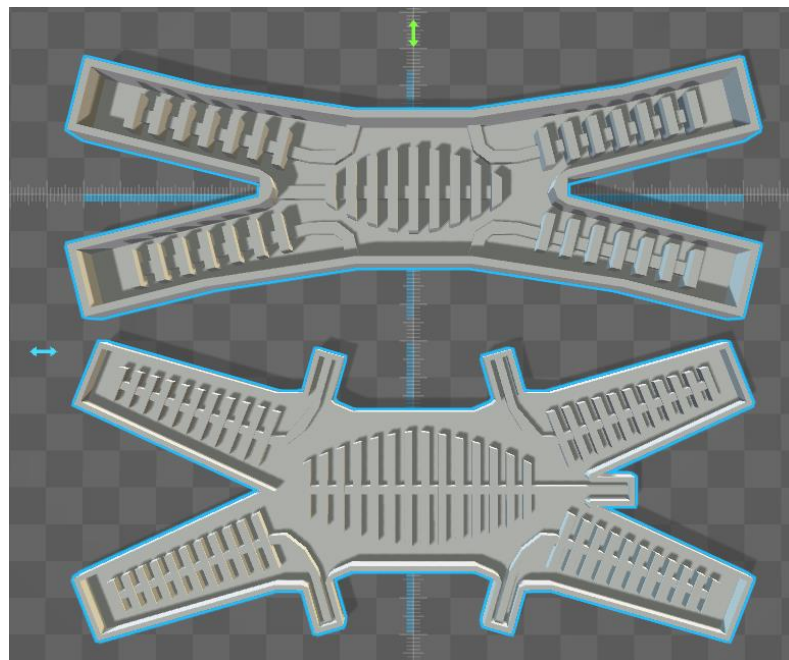


Figura 86: Comparativa entre las secciones de ambos modelos, antiguo (parte superior) y revisado (parte inferior).

- Reducción del grosor: se pretende reducir al mínimo el material por encima y por debajo de la trama de cavidades, aligerando así el modelo. Se recuerda que para lograr el doblado deseado, es necesario que la capa de material por encima de las cavidades sea más delgada que la capa inferior. Con ello en mente, se produce la reducción de las capas citadas, pasando la altura del modelo de 18 a 8 mm (reducción de más de un 55%).
- B) Mejora de la unión del robot y los tubos de alimentación neumática: en el modelo previo, para conseguir el sellado de la unión entre los elementos citados, era necesaria la fabricación de unas uniones que eviten el reflujo de aire hacia el exterior, que después se incorporaban al cuerpo principal pegándolos sobre el mismo. Era un procedimiento complejo, y en el que lograr un buen acabado era difícil.

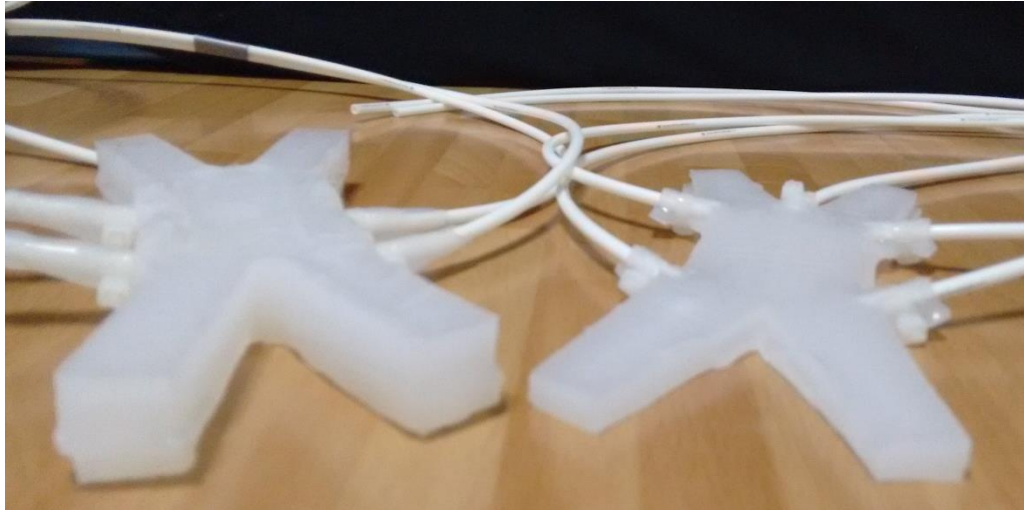


Figura 87: Diferencia de alturas entre el modelo antiguo (izquierda) y el revisado (derecha)

En la nueva versión del modelo, se incorpora al cuerpo superior del robot la unión de silicona, evitando así la fabricación por separado de los conectores.

- C) Cambio del proceso de fabricación. Las necesidades de reducción de peso lleva a una modificación de los pasos necesarios para la fabricación del robot.
 - Moldeo de un único cuerpo: en el modelo original se moldeaban dos cuerpos de silicona que después se unían empleando una capa del mismo material. En el modelo revisado, se fabrica un único cuerpo por moldeo (parte superior del robot), no siendo necesario moldear la parte inferior, ya que debido a la reducción de peso, ésta deja de ser un cuerpo macizo, para fabricarse a partir de láminas de pequeño espesor.
 - Método de unión entre cuerpos: al no existir dos cuerpos independientes como tal, lógicamente no existe la posibilidad de unirlos entre sí. Sin embargo, es necesario sellar el robot por su parte inferior, y conseguir que ésta sea de mayor espesor que su parte superior, para conseguir el doblado deseado. El procedimiento para conseguirlo consiste en fabricar láminas de silicona vertiendo una cierta cantidad de la misma en un recipiente, consiguiendo una película sobre la que se deposita el robot antes de que se cure la capa. Tras el proceso de secado, se obtiene un sólido sellado.

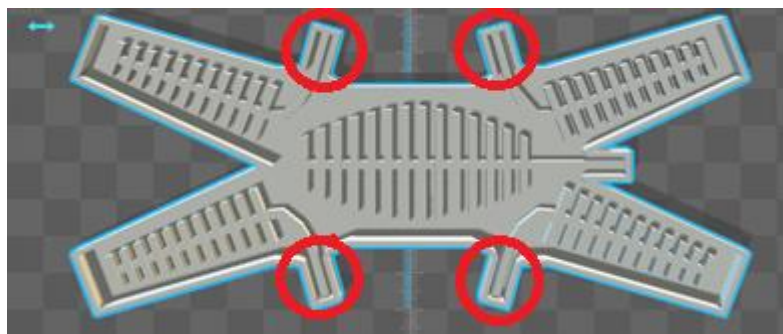


Figura 88: Acoples para los tubos integrados en la estructura del molde.

El proceso ha de repetirse tres veces hasta conseguir una capa lo suficientemente gruesa que funcione de la manera deseada. Es especialmente crítica la unión de la primera capa de silicona con el cuerpo superior. Éste ha de depositarse con suavidad y de manera uniforme sobre la capa, evitando movimientos bruscos, que puedan taponar los conductos de aire por acumulación de silicona en los mismos.

CAMBIOS EN EL MODO DE OPERACIÓN

Como es lógico, tras el cambio de diseño experimentado por el modelo, es necesario revisar las condiciones de operación del mismo, para garantizar su funcionamiento seguro y eficiente.

A) Cambios en la regulación

Resulta especialmente importante la regulación de los parámetros disponibles para el accionamiento, a saber, la presión de alimentación del circuito neumático y el volumen de llenado de las cámaras del robot (volumen de carga del mismo). Se recuerda que dicha variable ‘volumen de carga’ regula el llenado de todas las cámaras de manera proporcional al valor de la variable, que puede fijarse entre 0 y 1. Esto no quiere decir que todas las cámaras se llenen por igual, ya que cada una se regula en función de la secuencia de marcha escogida.

Ambos parámetros determinan la cantidad total de aire que se introduce en cada vejiga cuando ésta es accionada. Un incremento de la presión o del volumen de carga conllevan un inflado de mayor magnitud, y por tanto una deformación del robot más acusada. El aumento de deformación es deseable ya que permite un avance más rápido del dispositivo, creciendo así su eficiencia.

Sin embargo, es necesario tener presente los cambios estructurales de diseño que se han acometido en esta solución, los cuales han ido encaminados a la reducción de un gran volumen de silicona del cuerpo del robot, lo que hace que ahora la resistencia a la deformación del cuerpo haya disminuido. En otras palabras, ahora el robot ha de accionarse con valores de presión o volumen de carga menores que los acometidos en el diseño original, dado que su resistencia límite al llenado de las cámaras se ha visto disminuida por las modificaciones realizadas.

Tras realizar algunas pruebas preliminares, y tomando como referencia la experiencia previa adquirida con el modelo original, se decide enfocar la regulación del robot en base a dos premisas: operar con valores de presión reducidos, y efectuar la regulación de detalle utilizando el ‘volumen de carga’ como variable de referencia, en lugar de la presión de alimentación.

La presión de alimentación del circuito marca la velocidad de llenado de las cámaras, durante el tiempo que estas se mantienen abiertas. Dicho tiempo viene dado por la variable ‘volumen de carga’.

El análisis de resultados del modelo anterior mostraba como, para mantener el límite de seguridad del robot, el empleo de valores de presión elevados era necesario complementarlo con volúmenes de carga pequeños. Este factor afectaba al modo de funcionamiento del robot, ya que los ciclos de hinchado de las cámaras se sucedían a tal velocidad que era difícil conseguir el movimiento del robot.

De este modo, se decide trabajar con presiones de alimentación pequeñas, que llenan las cámaras a menor velocidad, consiguiendo así una regulación precisa de las mismas con la variable volumen de carga, esto es, dejando el paso de aire más o menos tiempo.

Por otra parte, se ha decidido también fijar un determinado valor de presión de alimentación y no variarlo entre ensayos, pese a la fuerte influencia que la modificación del parámetro tenía en las pruebas del modelo original.

Si bien en las pruebas originales el rango de presiones se movía entre los 0.75 y los 1.25 bares, ahora se trabaja a una presión fija de 0.5 bares, la cual se decide no variar debido a la dificultad de hacerlo con el instrumental del que se dispone.

Esto quiere decir que, debido a la naturaleza del regulador de presión, en el cuál el ajuste ha de realizarse manualmente, resulta complejo fijar con precisión la presión cuando el intervalo de la variación tiene valores pequeños, ya que el manómetro no presenta una escala lineal, y la lectura del mismo se vuelve más difícil.

B) Cambios en las condiciones de contorno

Uno de los problemas identificados en el diseño original era la fuerte fricción que experimentaba el robot con la superficie de contacto, motivada por la naturaleza de la silicona de construcción empleada. Si bien podría plantearse el cambio del material, y emplear otro con menor fricción, la bibliografía consultada ni siquiera identifica sustitutos con las mismas propiedades mecánicas que la silicona utilizada, de modo que no es posible afrontar la solución al problema desde esa perspectiva.

Es por ello por lo que se pretende abordar una alternativa que solucione esta situación. En el proyecto original se emplean adhesivos plásticos de carácter rígido situados debajo de las extremidades delanteras, que permitían la locomoción del robot.

Sin embargo, en un intento por mejorar el resultado final del avance, se decide implementar una solución que difiere en su naturaleza. Buscando una fricción mínima entre robot y superficie, se aprovecha el buen acabado que el nuevo método de fabricación obtiene sobre la superficie inferior del robot.

Este acabado es perfectamente liso, y muy adherente, condiciones que lo alejan de ser óptimo para la locomoción. Pero esas propiedades en principio contrarias al objetivo deseado, se aprovechan para disponer sobre dicha superficie una capa antifricción a base de polvo de talco, que queda perfectamente adherido, creando una película uniforme.

Este tratamiento transforma pues el comportamiento del material de silicona al añadirle un lubricante, y lo adapta a las necesidades de operación del robot. Cabe mencionar que el tratamiento seguido es prácticamente irreversible, esto es, las características adherentes originales son tales que incluso limpiando la superficie con agua o una tela húmeda, la silicona mantiene parte del talco de forma permanente.

Por lo tanto, la capacidad que tiene la silicona para aceptar el polvo de talco como recubrimiento superficial conduce a que, una vez aplicado el tratamiento, no es necesario repetirlo sobre el robot para que este se beneficie del efecto. De igual forma, tampoco es necesario la modificación de la superficie sobre la que actúa el robot, ya que el efecto del talco portado por el robot es suficiente para conseguir su correcto funcionamiento.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con todos los cambios citados, se procede a analizar el cambio que se ha producido en el funcionamiento final del robot. Para ello, se decide tomar como ensayo de referencia el realizado con el modelo original, a presión nominal de alimentación 1 bar, y ciclo de 10 repeticiones de la secuencia ‘ondulante’.

| Ensayo | Presión (bar) | Volumen de carga (%) | Repeticiones | Avance (mm) |
|--------|---------------|----------------------|--------------|-------------|
| 1 | 1 | 35 | 10 | 10 |
| 2 | 1 | 50 | 10 | 30 |
| 3 | 1 | 65 | 10 | 47 |

Se escoge la muestra expuesta por varios motivos, pero fundamentalmente porque sigue una de las premisas de la operación que se ha decidido imponer al nuevo modelo: mantiene la presión de alimentación constante, y varía el volumen de carga para hacer la regulación en detalle del sistema.

De forma estricta, el nuevo ensayo a ejecutar sobre el modelo revisado debería igualmente realizarse a 1 bar de presión de alimentación, sin embargo, como se ha explicado en la exposición de cambios ejecutados, el nuevo diseño dispone de un cuerpo de silicona con menor resistencia, debido a las medidas tomadas en busca de reducir su peso.

Por ese motivo, y porque se mejora la capacidad de regulación del sistema, la presión de alimentación se fija a 0.5 bar para efectuar el ensayo.

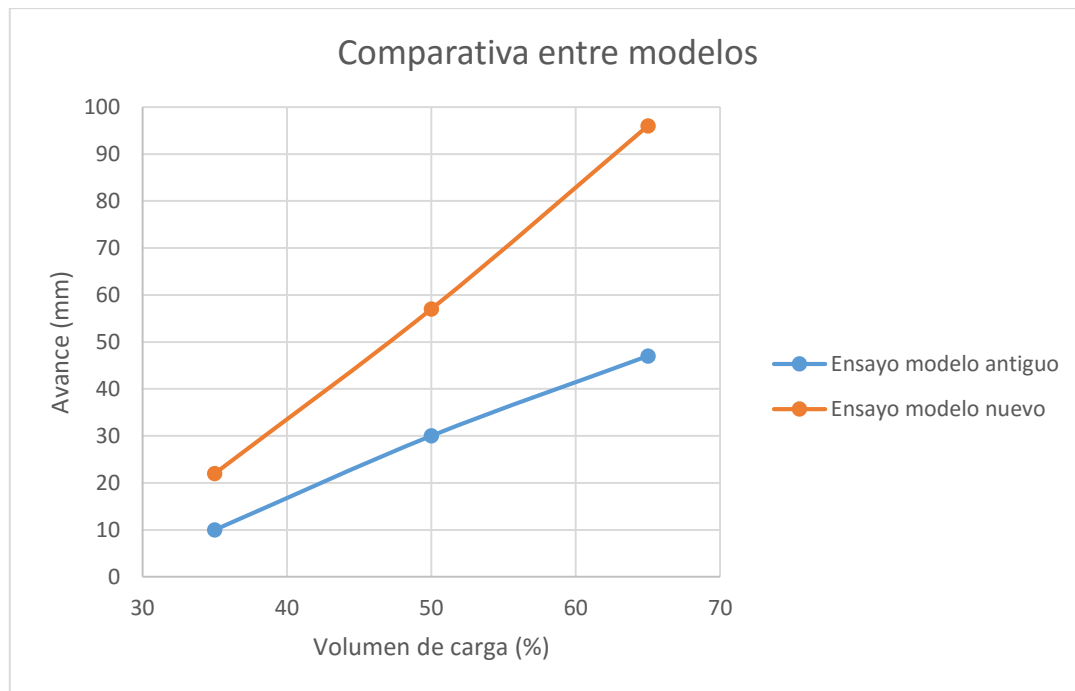
Los resultados del mismo se recogen en la tabla:

| Ensayo | Presión (bar) | Volumen de carga (%) | Repeticiones | Avance (mm) |
|--------|---------------|----------------------|--------------|-------------|
| 1 | 0.5 | 35 | 10 | 22 |
| 2 | 0.5 | 50 | 10 | 57 |
| 3 | 0.5 | 65 | 10 | 96 |

A simple vista, se puede observar cómo los resultados del nuevo modelo son claramente superiores a los obtenidos con el prototipo original, incluso trabajando con una presión de alimentación reducida.

Esto muestra de manera clara las virtudes del nuevo modelo, especialmente su eficiencia: disminuyendo al 50% la presión de alimentación, prácticamente se duplica el avance del robot. De esta forma, se consume menos energía en la operación del robot, lo que es ciertamente relevante de cara a la posible incorporación de un sistema autónomo de alimentación: el rango de operación (esto es, la distancia que el prototipo podría recorrer) se duplicaría con respecto al primer diseño, aproximadamente.

La comparativa entre el desempeño de ambos modelos se recoge en el gráfico expuesto a continuación.



Como se observa, el modelo nuevo supera con creces los resultados obtenidos por el prototipo original, manteniéndose igualmente la tendencia casi lineal en la variación del avance cuando se varía el volumen de carga.

CONCLUSIONES

A la luz de los resultados obtenidos en los nuevos ensayos, se puede confirmar que se cumplen los objetivos de esta revisión del proyecto.

Por una parte, se ha conseguido implementar de forma satisfactoria la guía de mejora propuesta en el documento original. Para ello, ha sido necesario transcribir las ideas recogidas en dicha guía en medidas particulares y concretas que aplicar a la revisión del robot.

Entre ellas, las más importantes atañen al diseño del prototipo, en el que se introducen importantes cambios orientados a la disminución de peso del mismo. Gracias a ellos, se consigue una mejor movilidad del robot, habilitando un desplazamiento más rápido y ágil.

Las medidas implementadas disminuyen el peso en aproximadamente un 60% sobre el original.

Para poder afrontar el nuevo diseño del prototipo, ha sido necesario un cambio en el proceso de fabricación. Se pasa de tener dos cuerpos independientes que se unen con silicona, a disponer de un único cuerpo que se sella con pequeñas capas de silicona.

Además, para optimizar el funcionamiento del robot es necesario modificar el modo de operación del mismo, empleando para ello una presión de alimentación fija de 0.5 bares (reduciéndola frente al modelo original). Igualmente, se modifica la naturaleza del contacto entre la silicona y la superficie de avance para reducir la fricción y mejorar el avance.

Con todas estas medidas correctamente implementadas se ha conseguido mejorar la eficiencia del robot, así como su efectividad, ya que el robot es capaz de desplazarse al doble de velocidad empleando para ello la mitad de presión de alimentación.

ANEXO

De este modo, se cierra satisfactoriamente la revisión del proyecto, habiendo cumplido con los objetivos de la misma, que no eran otros más que la mejora del proyecto original en términos de rendimiento y desempeño.