



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ROBOTS MODULARES BLANDOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

ANDREA ALEJANDRA VERGARA PULGAR

PROFESOR GUÍA:
JUAN CRISTÓBAL ZAGAL MONTEALEGRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO HERNÁNDEZ PELLICER
RICARDO MENDOZA GARCÍA

SANTIAGO DE CHILE
2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico
POR: Andrea Alejandra Vergara Pulgar
FECHA: 19/01/2015
PROFESOR GUÍA: Juan Cristóbal Zagal

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ROBOTS MODULARES BLANDOS

El presente trabajo de título consiste en el diseño y fabricación de un sistema robótico modular blando, acompañado de su respectiva caracterización técnica. El sistema se forma mediante la unión o conexión de varios módulos o unidades básicas iguales (sistema modular) y tiene la característica de que el material predominante sea resina elastomérica (robótica blanda), lo que brinda al sistema de flexibilidad en su estructura y las deformaciones que puede alcanzar.

El diseño consiste en un cubo con una cámara interior vacía y cavidades en cada cara para el alojamiento de imanes, que actúan como sistema de acoplamiento entre módulos. La expansión se produce al inyectar aire comprimido a la cámara interna.

Se simulan sistemas en el software VoxCad con características similares a las del diseño, con los cuales se puede apreciar la potencialidad que un sistema robótico modular blando posee: adaptabilidad de forma, flexibilidad de movimiento, alta resistencia a impacto, y la capacidad de prescindir de mecanismos complejos para su actuación.

La fabricación se realiza por colada de una resina de silicona flexible y las piezas rígidas se producen por impresión 3D de tipo SLS. El método propuesto es sencillo y no requiere herramientas especiales.

Los módulos resultan ser más resistentes de lo esperado, presentando fallas que muchas veces son fáciles de reparar y resistiendo expansiones de hasta diez veces su volumen inicial. Un módulo es capaz de soportar hasta ocho módulos conectados verticalmente y dos horizontalmente. La respuesta de los módulos al impulso es rápida, alcanzando el volumen final en 200 ms. La actuación en conjunto es similar a la simulada cualitativamente. La falla más común del sistema consiste en la desconexión de los módulos de las mangueras de aire a presión, lo que actúa como válvula de alivio del sistema evitando la rotura de los módulos. Como característica adicional se puede incluir la fácil reparación de los módulos luego de alguna rotura bajo ciertas condiciones como limpieza del módulo y tamaño reducido de la falla. Finalmente se estima que el costo en materiales de cada módulo es alrededor de US\$ 5, sin contar costos de envío, de los moldes necesarios para la fabricación o la electrónica de control.

El sistema posee características suficientes para formar estructuras simples y aprovecha las ventajas respectivas de la robótica blanda y modular. Además se identifican algunas mejoras posibles, destacando la degasificación de la resina para aumentar la resistencia de los módulos y la mejora del sistema de acoplamiento.

AGRADECIMIENTOS

Completar este trabajo fue posible gracias a la contribución directa de muchas personas que merecen reconocimiento, por su desinteresado apoyo. Primero quiero agradecer a los profesores de la comisión y a Roberto Corvalán, todos de altísimo nivel académico, en especial al profesor Juan Cristóbal por proponer el tema de memoria y dirigir su desarrollo. También quiero agradecer a Ariel Calderón, Joakin Ugalde, Manuel Iglesias, Felipe Lobiano y Fabián Lorca, que prestaron apoyo técnico durante las etapas de fabricación y experimentación del sistema robótico. Claramente es imposible nombrar a todas y cada una de las personas que alimentaron el desarrollo de este trabajo en algún momento, por lo que se les agradece de manera genérica sin discriminar por la importancia de su contribución.

Aparte de las contribuciones directas y tangibles en este documento, considero importante reconocer y dar gracias a otras personas que hicieron posible que llegara a este momento de la forma en que lo hice.

A mis padres, porque sin la educación que se preocuparon de darme desde que nací probablemente no estaría aquí, en especial a mi madre que cultivó mi interés académico y se preocupó de mi formación valórica. A mis hermanos también, pero por motivos distintos: a Mailén por ser como una segunda madre y a Cristián por todo lo que compartimos y las enriquecedoras discusiones coloquiales.

A Leonardo Stari, por amarme mucho y demostrarlo con su apoyo en todas las situaciones difíciles que he tenido que enfrentar desde que lo conozco.

Finalmente extendiendo mis agradecimientos a un conjunto de gente que me acompañó durante mi formación profesional e hicieron mucho más agradable el proceso: mis amigos de la vida Matías Herrera y Llong Su Yu, los integrantes de los grupos organizados Animé no Seishin Doukoukai y el Club de Rol Ingeniería, mis compañeros de carrera y mis compañeros memoristas del laboratorio de síntesis de máquinas inteligentes.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCION.....	1
1.1 Objetivo General.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
2.1 Robótica Modular.....	3
2.1.1 Cambio de configuración móvil (MCC).....	4
2.1.2 Locomoción de cuerpo completo (WBL).....	5
2.1.3 Sub-categorías de arquitectura.....	6
2.1.4 Mecanismos de acoplamiento.....	8
2.2 Robótica Blanda.....	9
2.3 Modelo teórico de elasticidad.....	12
2.3.1 Elasticidad de una sola molécula.....	12
2.3.2 Elasticidad de una red tridimensional de moléculas.....	14
2.3.3 Teoría del continuo de la elasticidad de elastómeros.....	17
3. DISEÑO DE LOS MÓDULOS Y SISTEMA.....	19
3.1 Definiciones preliminares.....	19
3.2 Diseño de módulos.....	20
3.3 Diseño del sistema.....	23
3.3.1 Simulación.....	23
3.3.2 Circuito de control.....	27
4. FABRICACIÓN DE MÓDULOS.....	31
5. ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	35
5.1 Número máximo de módulos conectados vertical y horizontalmente.....	36
5.2 Curva estática presión-volumen.....	36
5.3 Resistencia a la presión.....	37
5.4 Respuesta al impulso.....	39
5.5 Construcción y prueba de sistema.....	40
6. RESULTADOS.....	41
6.1. Comportamiento individual.....	42
6.2. Comportamiento del sistema.....	44
6.3. Costo unitario.....	52

6.4.	Operación y mantenimiento	53
7.	DISCUSIÓN.....	54
7.1	Diseño	54
7.2	Fabricación.....	55
7.3	Desempeño.....	56
8.	CONCLUSIÓN	58
	Bibliografía.....	59
	ANEXO A	60
	ANEXO B.....	68
	ANEXO C.....	70
	ANEXO D	76

Índice de tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de mecanismos de acoplamiento para robots modulares.	8
Tabla 2. Características preliminares módulos blandos	19
Tabla 3. Características módulos del sistema robótico blando.....	41
Tabla 4. Detalle costo unitario.....	52

Índice de ilustraciones

Figura 1 – Clasificación para robot modulares.....	4
Figura 2 – Seis quadracópteros llevando un anillo en forma cooperativa.....	4
Figura 3 – Dos Kilobots comunicándose (arriba) y mil módulos formando una figura (abajo).5	
Figura 4 – Varios módulos de M-TRAN en distintas configuraciones.	6
Figura 5 – Robot modular Odin.....	6
Figura 6 – Robot modular PolyBot.....	7
Figura 7 – Un módulo de SuperBot (izq.) varios módulos en distintas configuraciones (der.) .7	
Figura 8 – Corte longitudinal de un actuador hecho con dieléctrico elastomérico	10
Figura 9 – Cuerpo blando con actuación radial por resortes de SMA.....	11
Figura 10 – Robot blando accionado por aire comprimido.....	11
Figura 11 – (a) Una sub-unidad de polímero. (b) Una molécula de polímero libre. (c) Una molécula de polímero bajo tracción.....	12
Figura 12 – Relación entre la fuerza (f/kT) y la distancia media entre extremos en una molécula (r/nl).....	14
Figura 13 - (a) Estado sin deformar. (b) Estado deformado	15
Figura 14 – Diagrama módulo con cortes transversales.....	20
Figura 15 – Distribución sistema de acoplamiento	21
Figura 16 - Dibujos isométricos Marco Imán.....	21
Figura 17 - Vistas Marco Imán: (a) Superior, (b) Frontal	22
Figura 18 – Corte transversal módulo completo	23
Figura 19 – Volumen de los módulos simulados en el tiempo.....	24
Figura 20 – Sistema 1, de ocho módulos formando una línea.....	24
Figura 21 – Secuencia de movimiento simulada para Sistema 1	25
Figura 22 – Sistema 2, de ocho módulos formando un cubo	25
Figura 23 – Secuencia de movimiento simulada para Sistema 2	25
Figura 24 – Sistema 3, de ocho módulos y tres pisos.....	26
Figura 25 – Secuencia de movimiento simulada para Sistema 3	26
Figura 26 – Desplazamiento del centro de masa de sistemas, en un periodo de 100 segundos26	
Figura 27 – Velocidad instantánea del centro de masa de sistemas, en un periodo de 100 segundos	27
Figura 28 – Circuito eléctrico de control de sistema	28
Figura 29 – Circuito neumático de sistema	29
Figura 30 –Programa de activación implementado con solenoides.. ..	29
Figura 31 – Secuencia real de expansión estimada, de periodo 8,8 segundos.	30
Figura 32 – Molde 1 desarmado parcialmente.	31
Figura 33 – Molde 2 desarmado.	31
Figura 34 – Proceso de fabricación	32
Figura 35 – Desmolde y corte de rebabas. (i) Desmolde y corte de rebabas para el cuerpo del molde 1. (ii) Desmolde y corte de rebabas para el cuerpo del molde 2.....	33

Figura 36 – Soldadura de silicona para unión de partes. (i) Paleta colocando silicona líquida sobre borde de cuerpo blando. (ii) Unión de partes	33
Figura 37 – Inserción de conjunto imán-marco en “bolsillo”	33
Figura 38 – Corte transversal de cuerpo blando (izq) y módulo terminado (der).	34
Figura 39 – Prueba de número máximo de módulos conectados: verticalmente (izq.) horizontalmente (der.)	36
Figura 40 – Montaje para curva estática presión-volumen.....	37
Figura 41 – Montaje para resistencia a la presión	38
Figura 42 – Montaje respuesta al impulso.....	39
Figura 43 – Montaje para prueba de sistema.....	40
Figura 44 – Seis módulos conectados y expansión del módulo medio superior (mediante jeringa)	41
Figura 45 – Gráfico curva estática presión-volumen de un módulo.....	42
Figura 46 – Módulo de 8 cc (izq.) y módulo de 63 cc (der.).....	43
Figura 47 – Respuesta temporal de un módulo a un pulso de presión (20 psi).....	43
Figura 48 – Sistema 1 real	44
Figura 49 – Sistema 2 real	44
Figura 50 – Sistema 3 real	45
Figura 51 – Desplazamiento total centro de masa Sistema 1	46
Figura 52 – Desplazamiento total centro de masa Sistema 2	46
Figura 53 – Desplazamiento total centro de masa Sistema 3	47
Figura 54 – Desplazamientos totales de centros de masa de Sistemas 1, 2 y 3.....	48
Figura 55 – Desplazamientos en X (arriba) e Y (abajo) Sistema 1	49
Figura 56 – Desplazamiento en X (arriba) e Y (abajo) Sistema 2.....	50
Figura 57 – Desplazamiento en X (arriba) e Y (abajo) Sistema 3.....	51
Figura 58 – Costo unitario en materiales.....	52

1. INTRODUCCION

La robótica es una rama que se ha desarrollado en busca de facilitar y optimizar el trabajo de las personas, como la robótica aplicada a la industria y sectores productivos, o lograr tareas que de otra forma no seríamos capaces de realizar, como explorar lugares inaccesibles o realizar tareas bajo condiciones extremas. Sin embargo, se presentan desafíos que requieren superar algunas limitaciones típicas de la robótica convencional, esto es, la baja capacidad de adaptarse a situaciones nuevas y recuperarse frente al daño.

En respuesta al problema anterior, ha surgido una nueva rama de la robótica conocida como “robótica blanda”, que consiste en utilizar materiales deformables para construir robots. Con este concepto, se abre un nuevo campo de investigación en la robótica, consistente en explorar las limitaciones de los robots blandos y desarrollar prototipos para nuevas aplicaciones donde sus características sean favorables.

Por otro lado, la robótica modular es un tema que fue introducido a finales de los 80’, donde se desarrolla un sistema robótico compuesto de varias unidades básicas autónomas llamadas “células” con la capacidad de comunicarse e interactuar entre sí. Al conectarse las células, se forma un robot compuesto con capacidades nuevas y con forma variable. A partir de este prototipo se han desarrollado más sistemas robóticos modulares hasta algunos más recientes, incluso para juguetes infantiles (Cubelets™ de la compañía Modular Robotics).

1.1 Objetivo General

El presente trabajo de título tiene por objetivo general diseñar y fabricar robots modulares blandos, con forma de cubos y capaces de: acoplarse por cualquiera de sus caras y expandirse individualmente al doble de su volumen inicial en forma controlada y estable, para lograr el desplazamiento del sistema de módulos.

1.2 Objetivos específicos

Para cumplir el objetivo anterior es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar módulos o unidades básicas en forma de cubo, donde cada uno esté dotado de un sistema de actuación que permita su expansión al doble de su volumen inicial y sistema de

acoplamiento que mantenga la unión de al menos 5 módulos en forma horizontal y 2 en voladizo.

- Simular en el software VoxCad sistemas modulares blandos capaces de desplazarse en terreno liso y que tenga como mínimo 8 módulos o unidades básicas similares a los módulos que se diseñan.
- Fabricación de al menos 8 módulos o unidades básicas, ambos en base a resina de silicona para las secciones blandas y plástico para secciones rígidas.
- Realizar pruebas experimentales: medición de volumen máximo de expansión de cada módulo, cantidad máxima de módulos unidos horizontalmente en voladizo, y caracterización de la deformación individual.

Como sugieren los objetivos específicos, el trabajo contempla el desarrollo del sistema robótico y su validación (es decir, si las células son realmente robots modulares), pero no incluye el desarrollo de aplicaciones para el sistema ni su programación para desempeñar actividades específicas. En pocas palabras, se busca desarrollar una nueva herramienta para la robótica blanda.

Para el trabajo se propone de antemano la forma de los módulos (cúbica) y el accionamiento: inyección de aire a presión. De esta forma, el principio de funcionamiento de los módulos se encuentra en su expansión volumétrica por acción de presión ejercida al interior del cuerpo blando, y mediante el acoplamiento de éstos se pretende formar un sistema blando capaz de deformarse por secciones.

2. ANTECEDENTES

2.1 Robótica Modular

El término robótica modular se refiere a una familia de sistemas robóticos compuestos por pequeñas unidades interconectadas llamadas módulos, que se unen a través de interfaces de acoplamiento. Los módulos son estructuras relativamente simples, con sus propios sistemas de actuación, sensores y medios de cálculo. A pesar de ser independientes unos de otros, los módulos se encuentran dotados de sistemas de acoplamiento que permiten su conexión para formar un sistema robótico con mayores capacidades. Esa característica hace que los robots modulares sean llamados sistemas reconfigurables o auto-reconfigurables, de acuerdo a si la estructuración del sistema es dirigida externamente o realizada de forma autónoma por los módulos.

La modularidad brinda al sistema robótico ventajas funcionales y económicas respecto a los robots convencionales. Un robot modular es capaz de adaptarse a situaciones nuevas y cambios en el entorno a través del ordenamiento de sus módulos, por ejemplo reconfigurarse para desplazarse en distintos tipos de superficie. Admite modificaciones de forma rápida y sencilla, como aumento o disminución del número de módulos del sistema, y permite acoplar eventuales módulos especiales que faciliten la realización de una tarea específica (ganchos, sensores, baterías, y otros). Otra característica que persigue el concepto es la producción en masa de módulos que son sencillos al compararlos con robots especializados, resultando en un proceso de fabricación más económico.

Sin embargo, estas ventajas son sólo potenciales en la actualidad, ya que en la práctica un robot convencional especializado generalmente tiene mejor desempeño global que su contraparte modular. En ciertas aplicaciones donde los robots convencionales no funcionan adecuadamente, como exploración o desplazamiento por lugares estrechos, los robots modulares representan una buena alternativa.

El desarrollo de la robótica modular se inicia a finales de los años 80' y de acuerdo a los avances logrados es posible clasificar los robots modulares en dos grandes grupos de acuerdo a sus patrones de movimiento y estructura [1]: cambio de configuración móvil (MCC por sus siglas en inglés) y locomoción de cuerpo completo (WBL por sus siglas en inglés). También existen subcategorías que clasifican de acuerdo a geometría, sistemas de acoplamiento y modalidad de reconfiguración. Otra clasificación aceptada que aborda las subcategorías mencionadas es: arquitectura de red, arquitectura de cadena o árbol y arquitectura híbrida. La Figura 1 resume las clasificaciones tratadas anteriormente.

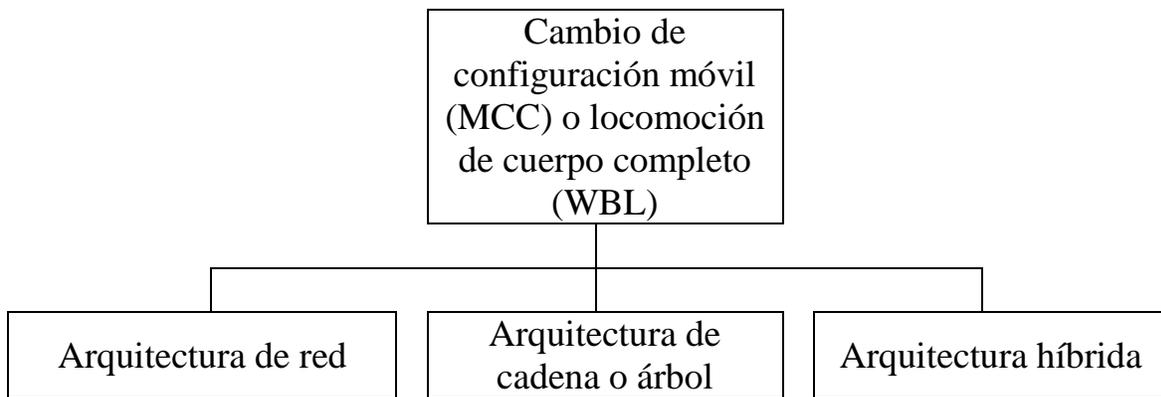


Figura 1 – Clasificación para robot modulares

2.1.1 Cambio de configuración móvil (MCC)

Esta clase de robots modulares se caracterizan por tener módulos capaces de moverse e interactuar con el medio por sí solos, es decir, cada módulo es útil e independiente del resto [1]. Normalmente estos robots utilizan arquitectura de cadena, de forma que la cabeza de un módulo se conecta a la cola de otro. Los robots MCC desarrollados hasta ahora utilizan mecanismos convencionales para moverse y operar, como ruedas y ganchos. A través de la capacidad de conectarse, los módulos pueden trabajar como enjambre y ayudarse entre sí para la realización de una tarea. A continuación se muestran dos ejemplos de robots modulares de tipo MCC.



Figura 2 – Seis quadrópteros llevando un anillo en forma cooperativa. Fuente: [2]

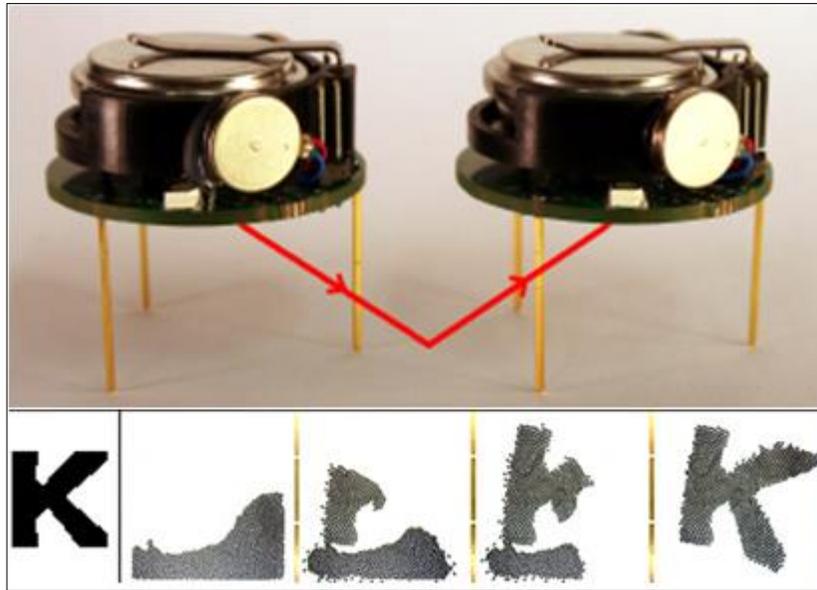


Figura 3 – Dos Kilobots comunicándose (arriba) y mil módulos formando una figura (abajo). Fuente: [3]

La Figura 2 muestra seis cuadracópteros trabajando cooperativamente para trasladar un anillo grande. La Figura 3 muestra arriba dos Kilobots, robots vibratorios capaces de actuar como enjambre de forma descentralizada. Cabe destacar que en ambos sistemas, cada módulo es capaz de moverse en forma individual, pero están diseñados para actuar en conjunto para lograr tareas nuevas (desplazar objetos grandes o formar figuras, respectivamente).

2.1.2 Locomoción de cuerpo completo (WBL)

Un robot de tipo locomoción de cuerpo completo se caracteriza por sus módulos incapaces de movilizarse eficientemente y operar adecuadamente de forma separada, es decir, en un robot modular tipo WBL es necesario que se conecten cierta cantidad de módulos para desplazarse [1]. Un sistema de este tipo usa la configuración de sus módulos para dotar al conjunto de capacidades, construyendo mecanismos de desplazamiento en vez de tenerlos integrados en cada módulo por separado. En los sistemas auto-reconfigurables los módulos tienen la capacidad de moverse y desplazarse lentamente con la única finalidad de acoplarse o desacoplarse de otros, a esto se le llama un desplazamiento no eficiente.

Se han desarrollado robots modulares tipo WBL con los tres tipos de arquitectura mencionados anteriormente (cadena, red e híbrido). La Figura 4 muestra un ejemplo de robot modular tipo WBL, donde es posible apreciar que los módulos no son capaces de moverse solos, pero juntos forman estructuras que permiten su desplazamiento.

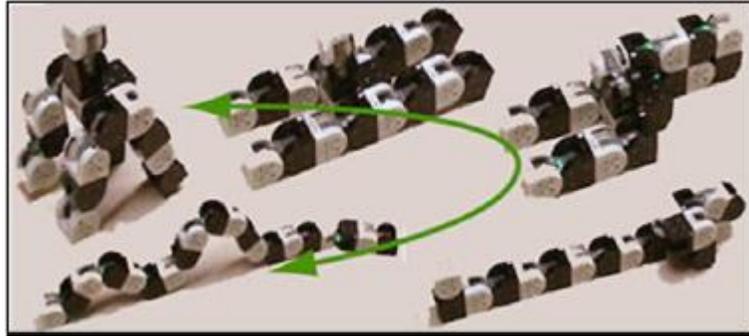


Figura 4 – Varios módulos de M-TRAN en distintas configuraciones. Fuente: [4]

2.1.3 Sub-categorías de arquitectura

Como fue mencionado antes, se identifican tres tipos de arquitectura para la construcción de sistemas robóticos modulares: de red, cadena o árbol e híbridos.

- Arquitectura de red: Esta configuración es común cuando los módulos son cubos o paralelepípedos, puesto que las superficies planas favorecen la conexión en red. La propiedad más importante de esta configuración es que la cantidad posible de ordenamientos alrededor de un módulo es finita y bien definida, lo que facilita el análisis del sistema y planear la actuación individual de cada módulo en un tiempo dado. La Figura 5 muestra un ejemplo de robot modular con arquitectura de red, donde es posible notar dos tipos de módulos y que la posición que ocupan los módulos alrededor de otro es finita y bien definida (dos para el módulo alargado y ocho para las juntas esféricas, con uniones fijas).



Figura 5 – Robot modular Odin. Fuente: [5]

- Arquitectura de cadena o árbol: De acuerdo a lo mencionado en la sección 1.1.1, esta configuración es común en robots modulares de tipo MCC. Cada módulo puede estar conectado a otros dos, pero la principal diferencia con la arquitectura de red es que las posiciones de los módulos adyacentes son prácticamente infinitas o no se encuentran bien definidas. Esta configuración puede ser más complicada de controlar y analizar, pero otorga mucha más flexibilidad al sistema. La Figura 6 muestra un ejemplo de robot modular con arquitectura de cadena, donde se aprecia la flexibilidad de la cadena.



Figura 6 – Robot modular PolyBot. Fuente: [6]

- Arquitectura híbrida: Este tipo de arquitectura trata de aprovechar las ventajas de las anteriores, mediante la construcción de un sistema que mezcla ambas. Un sistema híbrido puede lograrse a través de la incorporación de módulos de tipo red y tipo cadena, o el diseño de módulos híbridos. Por ejemplo, la Figura 7 muestra un robot modular híbrido cuyos módulos están formados por dos semi-cubos unidos en el centro y con la capacidad de girar respecto a éste, con lo que el módulo puede doblarse girando en tres grados de libertad (correspondiente a arquitectura de cadena), pero la unión entre módulos es rígida sobre las caras externas (correspondiente a arquitectura de red).

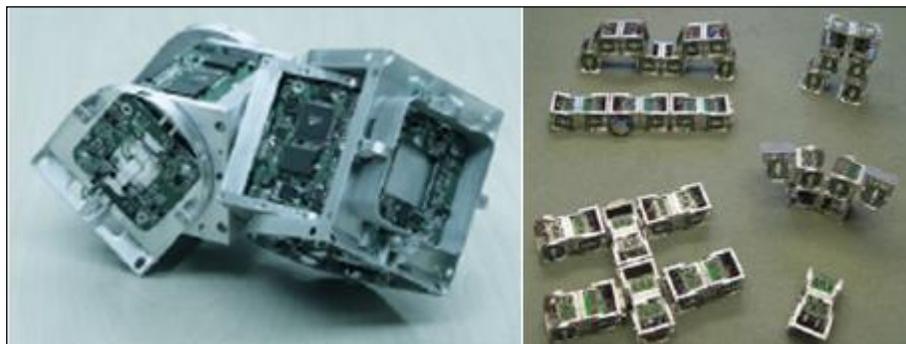


Figura 7 – Un módulo de SuperBot (izq.) varios módulos en distintas configuraciones (der.). Fuente: [7]

2.1.4 Mecanismos de acoplamiento

Otro aspecto importante a considerar de la robótica modular es mecanismo de acoplamiento, ya que es el que permite la unión de los módulos. Desde el inicio del estudio de la robótica modular se han propuesto distintos tipos de mecanismos para acoplamiento de módulos. En general, los mecanismos o sistemas de acoplamiento pueden ser de los siguientes tipos según su principio de funcionamiento [8]:

- Fuerzas mecánicas
- Fuerzas magnéticas o electro-magnéticas
- Fuerzas electrostáticas
- Fuerzas hidrostáticas (presión de líquidos)
- Fuerzas atmosféricas (presión de gases)

Los mecanismos de acoplamiento pueden clasificarse también según la forma de interacción: pueden ser activos o pasivos, y también pueden tener o no género (conectores macho/hembra o hermafrodita).

Por lo general se aprovecha el sistema de acoplamiento para incorporar electrodos que permitan compartir información y energía entre módulos conectados.

La Tabla 1 compara las características de algunos tipos de conectores usados para robots modulares.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de mecanismos de acoplamiento para robots modulares. Fuente: [9]

Conector	Simplicidad	Fuerza	Ahorro energético	Facilidad conexión	Facilidad desconexión	Integración ^a
Ganchos activos	XX	✓	✓	✓	✓	X
Ganchos pasivos	✓	✓	✓✓	X ^b	X ^b	✓
Imanes permanentes	✓✓	X ^c	✓✓	✓✓	X ^c	✓
Electro-imanés	X	X	XX	✓✓	✓✓	X
Magswitches	XX	X	✓✓	✓✓	✓✓	X
Electro-imanés permanentes	X	X	✓✓	✓✓	✓✓	✓ ^d
Velcro	✓✓	XX	✓✓	✓✓	✓✓	✓
Pastillas soldables	✓✓	✓✓	✓	✓	✓	✓✓
Vacío	✓ ^e	✓	✓✓	✓	X ^e	X

Nota: XX, debilidad inherente al conector; X, debilidad evitable por diseño; ✓, fortaleza lograda por diseño; ✓✓, fortaleza inherente al conector.

^a Con otros hardware, como componentes electrónicos para computación, comunicación, potencia, actuación y sensores.

^b Módulos son fáciles de conectar/desconectar a mano pero no tanto de forma autónoma.

^c Tradeoff. Módulos con imanes fuertes son difíciles de desconectar.

^d Electro-imanés permanentes pueden ser usados también para comunicación y transferencia de energía.

^e Tradeoff. Módulos de sistemas simples (con bomba única, por ejemplo) son fáciles de desarmar por completo pero difícil de desconectar uno a uno.

Es fácil ver no existe el mecanismo perfecto, sino que todos presentan dificultades en algún aspecto. Los mecanismos de acoplamiento prácticamente varían con cada robot modular en desarrollo, ya que la forma de incorporarla al cuerpo del módulo depende fuertemente de su geometría, y también de la actuación propia del sistema. Debido a la amplia gama de posibilidades aún es posible hacer desarrollo original sobre mecanismos de conexión para robótica modular.

2.2 Robótica Blanda

Otra forma de superar los problemas de la robótica convencional es a través de la robótica blanda. Se denomina de esta forma a los sistemas robóticos que utilizan materiales elastoméricos en vez de plásticos rígidos o metal para su construcción. El resultado es un robot flexible y elástico, capaz de soportar caídas y golpes, de comprimirse para caber en espacios reducidos y de realizar movimientos más complejos y naturales.

El estudio de la robótica blanda comienza en el área de la biología, buscando imitar los movimientos de algunos animales invertebrados, como el pulpo y el gusano, para facilitar su modelamiento. Por otro lado, es posible notar que en la naturaleza predominan los materiales deformables para componer seres vivos, no sólo en los animales invertebrados, sino también en los vertebrados al tener tejidos blandos y fluidos constituyendo un porcentaje mayoritario en su composición corporal. Es por esto que se dice que la robótica blanda es bio-inspirada. Lo anterior ha provocado muchos desarrollos en la robótica utilizando materiales blandos para el diseño, ya que podría acelerar el desarrollo de los robots para que sean más seguros para interacción con humanos y ambientes naturales (que tienden a ser de mayor complejidad).

Se estima que el estudio de la naturaleza, de cómo los animales utilizan los materiales blandos para moverse en ambientes complejos e impredecibles, puede ayudar a desarrollar aplicaciones robóticas para la medicina, operaciones de búsqueda y rescate, respuesta a desastres y asistencia humana. En efecto, es posible encontrar limitaciones de la robótica blanda en la naturaleza. Por ejemplo, los animales invertebrados tienden a ser pequeños puesto que de otra forma no podrían sostener su peso corporal, es más, los grandes animales invertebrados son marinos o viven bajo tierra ya que es el medio el que sostiene el peso en esos casos. Además de las pistas que puede entregar el estudio de sistemas biológicos, resulta ser un buen acercamiento para trabajar con materiales blandos, ya que la teoría sobre sistemas blandos está menos desarrollada y es más complicada que con los materiales rígidos.

Debido a las dificultades de trabajar con estructuras blandas, principalmente el generar movimiento, se ha tratado de imitar los músculos de los animales utilizando distintos actuadores, es decir, dispositivos que ejercen fuerza sobre el cuerpo para que se deforme. En la actualidad existen tres formas de actuación populares para los robots blandos [10]: actuadores dieléctricos

elastoméricos (DEA, por sus siglas en inglés), aleaciones con memoria (SMA, por sus siglas en inglés) y fluidos presurizados.

- Actuadores dieléctricos elastoméricos (DEA): Están hechos de elastómeros dieléctricos, materiales inteligentes estudiados desde finales de los 90', que se deforman cuando son expuestos a diferencias de voltaje, imitando muy bien a los músculos y presentan un relativo alto desempeño deformación/esfuerzo y potencia por unidad de masa. Sin embargo, tienen la desventaja de que para la mayoría de los diseños es necesario agregar marcos rígidos para pretensar los actuadores, y aquellos diseños que no lo incorporan realizan esfuerzos bajos y tienen procesos de fabricación complicados. Otros problemas asociados a esta técnica son la necesidad de mejorar la confiabilidad de los electrodos utilizados y el uso de alto voltaje, que para muchas aplicaciones resulta indeseado. La Figura 8 muestra un actuador longitudinal construido con un resorte enrollado en film de un dieléctrico elastomérico pre-tensado.

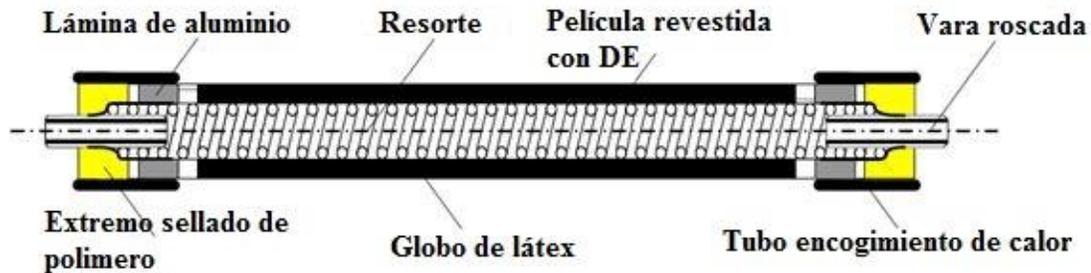


Figura 8 – Corte longitudinal de un actuador hecho con dieléctrico elastomérico. Fuente: [11]

- Aleaciones con memoria (SMA): El uso de aleaciones con memoria como actuador para robots blandos es una práctica popular entre los desarrolladores, ya que tienen una alta relación masa/fuerza específica. Debido a que la deformación es baja (alrededor de 5%) en aleaciones Níquel-Titanio comunes, en general se utilizan pequeños resortes hechos con alambre delgado de aleación para aumentar la deformación total y son integrados al cuerpo blando para lograr su deformación. La actuación en este caso depende de la temperatura, lo que exige que los robots que utilizan este sistema de actuación tengan un sistema robusto de control de temperatura antes distintos escenarios térmicos, lo que supone un desafío. La mayor parte de la energía entregada es consumida en calentar los alambres, por lo que el movimiento se vuelve muy poco eficiente a nivel energético (alrededor de 1%). Finalmente, al trabajar con este tipo de actuadores se debe cuidar que los alambres no sufran deformaciones excesivas o se sobrecalienten, pues podrían dañarse permanentemente. La figura 9 muestra el corte transversal de un tentáculo que varía su diámetro a través de la acción de resortes de SMA.

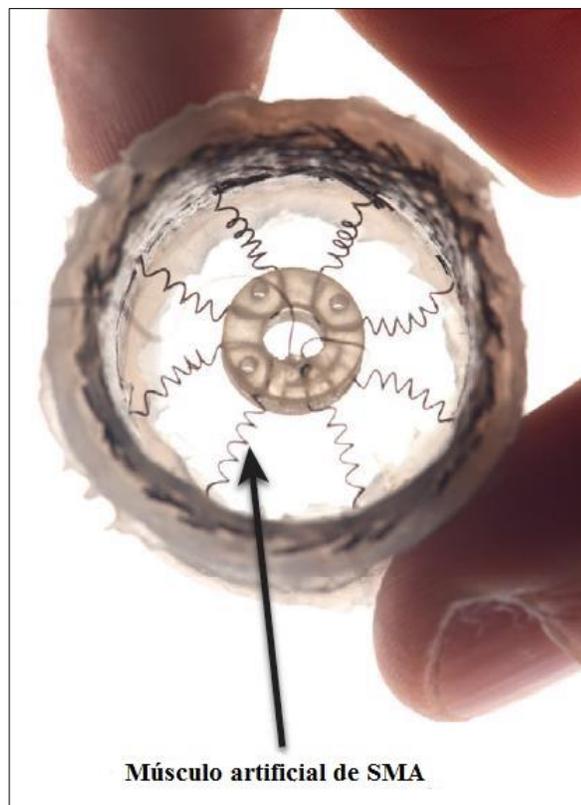


Figura 9 – Cuerpo blando con actuación radial por resortes de SMA. Fuente: [12]

- Aire comprimido y fluidos presurizados: Mediante el inflado de materiales blandos con inyección de aire comprimido o fluidos presurizados es posible obtener un sistema de actuación poderoso capaz de ejercer relativamente grandes fuerzas y deformaciones. En particular, mediante el adecuado diseño del cuerpo blando es posible generar distintas cámaras que permitan controlar el movimiento del robot al inflar dichas cámaras por separado o en distintas combinaciones. Sin embargo, podría requerirse alta potencia o sistemas complejos de suministro de aire comprimido. La Figura 10 muestra un robot blando con distintas cámaras internas y es capaz de desplazarse al inflarlas con aire.



Figura 10 – Robot blando accionado por aire comprimido. Fuente: [13]

2.3 Modelo teórico de elasticidad

La resina de silicona que se utiliza corresponde a un elastómero, por lo que es capaz de sufrir grandes deformaciones elásticas (hasta 900%) y exhibe un comportamiento elástico no lineal. Debido a que se busca diseñar los módulos para aumentar al doble su volumen, es importante entender el comportamiento no lineal del material.

El comportamiento elástico no lineal ha sido abordado por la teoría pasando fundamentalmente por dos etapas [14]: desarrollo inicial de un modelo molecular relacionando datos experimentales con la estructura molecular de los polímeros elastoméricos, y luego generalización del modelo anterior mediante consideraciones de simetrías tomadas de mecánica del continuo que son independientes de la estructura molecular.

2.3.1 Elasticidad de una sola molécula

Los polímeros se encuentran formados por muchas moléculas gigantes en forma de cadenas. Cada molécula se encuentra formada por muchas sub-unidades no colineales unidas por enlaces de valencia, formando una especie de espina dorsal. De esta forma la cadena molecular tiene mucha flexibilidad, pero cuando los extremos son sometidos a cargas se tienden a alinear las sub-unidades, permitiendo el estiramiento de la molécula. La Figura 11 muestra un ejemplo de sub-unidad de un polímero y la cadena formada por muchas de estas sub-unidades en una molécula.

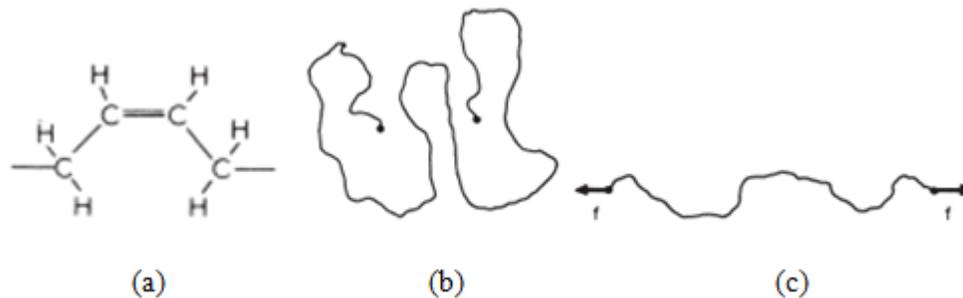


Figura 11 – (a) Una sub-unidad de polímero. (b) Una molécula de polímero libre. (c) Una molécula de polímero bajo tracción

Es de interés conocer la relación entre la fuerza, f , y la distancia promedio entre extremos de la molécula, r , que puede ser medido como promedio en el tiempo o sobre muchas cadenas en el mismo instante de tiempo. Las cadenas aisladas toman muchas configuraciones, gobernadas por tres factores: estadística de procesos aleatorios, preferencias por ciertas secuencias de enlaces debido a restricciones estéricas o energéticas dentro de la molécula y restricciones espaciales (dos partes de la cadena no pueden utilizar el mismo volumen).

De acuerdo a lo anterior, se propone en la literatura que la distancia media entre extremos de una molécula se distribuye de acuerdo a estadística Gaussiana para cadenas suficientemente largas, incluso si las cadenas presentan rigidez en algunas secciones cortas. Así, la relación entre la fuerza y la distancia media es lineal de la forma:

$$f = Ar \quad (1)$$

donde A es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia media entre extremos de la molécula en reposo, r_0^2 :

$$A = \frac{3kT}{r_0^2} \quad (2)$$

donde k corresponde a la constante de Boltzmann y T es la temperatura en grados Kelvin.

Si se considera un modelo de molécula hipotético, con un número grande n de enlaces rígidos y libremente articulados de largo l entonces:

$$r_0^2 = nl^2 \quad (3)$$

En este caso r_0^2 es independiente de la temperatura porque se asume un ordenamiento completamente aleatorio.

Para moléculas reales con una gran cantidad n de enlaces primarios de largo l cada uno:

$$r_0^2 = C_\infty nl^2 \quad (4)$$

donde C_∞ es un coeficiente que mide la divergencia de la molécula real respecto al modelo. Se encuentra experimentalmente que C_∞ tiene valores entre 4 y 10, dependiendo de la estructura molecular del polímero y la temperatura. $C_\infty^{1/2}l$ puede ser considerado como el largo de enlace efectivo de una cadena real, una medida de la “rigidez” de una molécula.

La ecuación (1) es bastante precisa para distancias entre extremos r relativamente cortas, alrededor de un tercio del estiramiento máximo de la molécula. Por lo anterior es necesario volver al modelo de enlaces libremente articulados:

$$\frac{f \cdot l}{kT} = L^{-1}\left(\frac{r}{nl}\right) \quad (5)$$

donde L^{-1} corresponde a la inversa de la función Langevin. Una expansión de esta relación en términos de r/nl ,

$$\frac{f \cdot l}{kT} = \frac{3r}{nl} \left[1 + \frac{3}{5} \left(\frac{r}{nl} \right)^2 + \frac{99}{175} \left(\frac{r}{nl} \right)^4 + \frac{513}{875} \left(\frac{r}{nl} \right)^6 + \dots \right] \quad (6)$$

entrega un indicio útil sobre donde es esperable diferencias significativas en la ecuación (1).

La ecuación (5) entrega una relación abruptamente ascendente entre f y r cuando la molécula se vuelve tensa, a diferencia de la ecuación (1) que se vuelve inválida para $r > \frac{1}{3}r/nl$. La relación entre tensión y deformación de elastómeros a altas deformaciones es similar a la curva descrita por la ecuación (5), con un incremento abrupto de la tensión a altas deformaciones. Se aprecia la diferencia entre la ecuación (1) y (5) en la Figura 12, donde la línea punteada corresponde a la ecuación (1) y la línea continua a la ecuación (5).

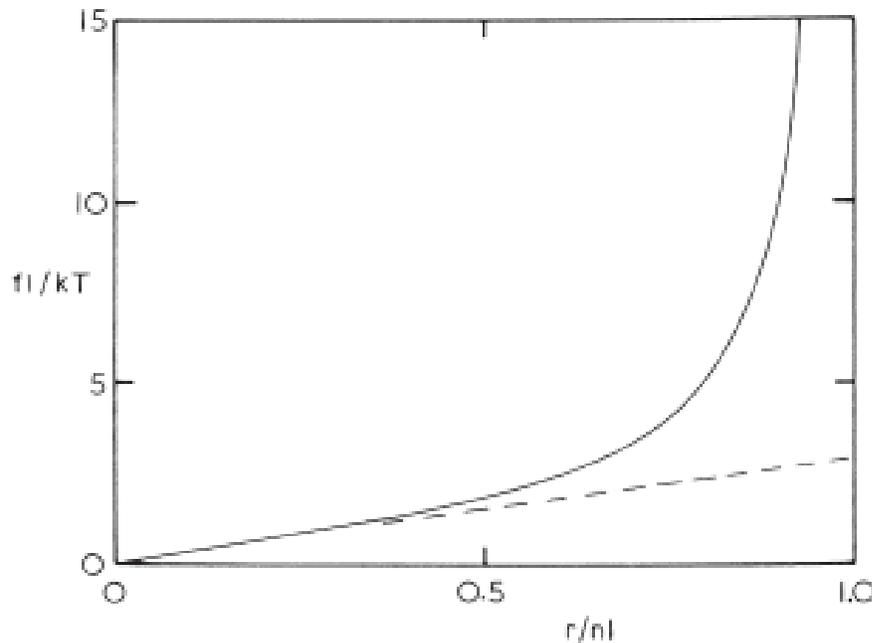


Figura 12 – Relación entre la fuerza (fl/kT) y la distancia media entre extremos en una molécula (r/nl). A medida que se estira la molécula, la fuerza necesaria para separar los extremos aumenta de forma lineal inicialmente y luego de forma exponencial. La línea punteada muestra la extrapolación de la recta inicial.

2.3.2 Elasticidad de una red tridimensional de moléculas

Para formar un sólido las moléculas de los polímeros se enlazan químicamente entre moléculas, formando una red floja tridimensional. Además de estos enlaces intermoleculares, también las cadenas se enredan entre sí, lo que explica el comportamiento elastomérico de transición al derretir el material (el comportamiento se mantiene cuando los enlaces intermoleculares se han roto). Si se consideran las cadenas enredadas equivalentes a los enlaces intermoleculares,

entonces el número efectivo de cadenas de la red N , es la suma del número de cadenas por enredamiento N_e y enlaces intermoleculares N_c :

$$N_e = \rho \frac{N_A}{M_e} \qquad N_c = \rho \frac{N_A}{M_c}$$

donde ρ es la densidad del polímero, N_A el número de Avogadro y M_c y M_e denotan el peso molecular promedio entre enlaces intermoleculares y enredamientos, respectivamente.

Sin embargo, esta forma para determinar N presenta algunas dificultades, transformándose en una cantidad mal definida.

Es conveniente expresar el comportamiento de la red en términos de la densidad de energía de deformación W por unidad de volumen no deformado. La energía de deformación w para una sola cadena se obtiene de la ecuación (1):

$$w = \frac{Ar^2}{2} \qquad (7)$$

Para una red aleatoria de N cadenas sometidas a una deformación general caracterizada por los ratios de extensión $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ (dimensión deformada/dimensión no deformada) en tres principales direcciones (ver Figura 13), W se obtiene como:

$$W = \frac{NAr_f^2(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3)}{6} \qquad (8)$$

donde r_f^2 corresponde a la distancia promedio entre extremos (puntos de entrecruzamiento o uniones equivalentes) en estado libre.

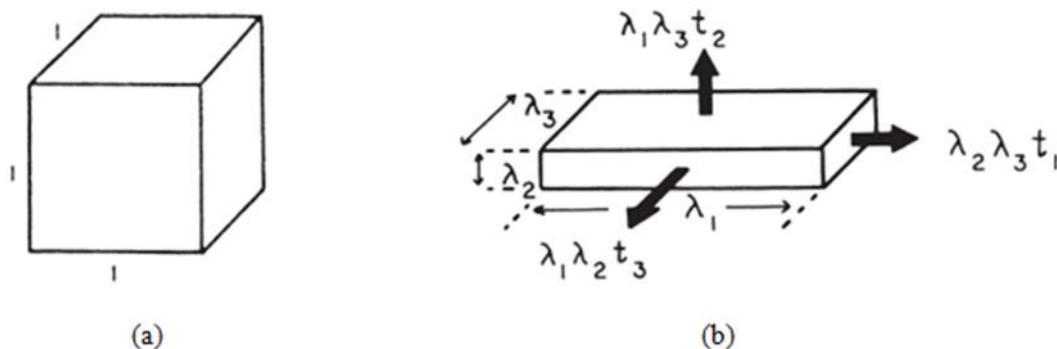


Figura 13 - (a) Estado sin deformar. (b) Estado deformado

Para entrecruzados aleatorios se puede asumir r_f^2 igual a r_o^2 , la distancia promedio entre extremos en cadenas no interconectadas del mismo largo molecular. Como A es inversamente proporcional

a r_o^2 (ecuación (2)) el único parámetro molecular que permanece en la ecuación (8) es el número N de cadenas efectivamente elásticas por unidad de volumen. Así, el comportamiento elástico de una red bajo deformaciones moderadas dependería solo en el número de cadenas moleculares y no en su flexibilidad, siempre que sean lo suficientemente largas para obedecer la estadística Gaussiana.

A pesar de que r_f^2 puede ser considerado igual a r_o^2 a la temperatura de formación del polímero, a otras temperaturas sus valores difieren, debido a la dependencia de r_o^2 con la temperatura. Otra manera de que estos dos valores difieran es que la red haya sido alterada luego de su formación.

De la relación general esfuerzo-deformación, ecuación (8), se desprende que los esfuerzos elásticos requeridos para mantener una deformación dada pueden ser obtenidos a través de consideraciones de trabajo virtual:

$$\lambda_2 \lambda_3 t_1 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} \quad (9)$$

con relaciones análogas para t_2 y t_3 , siendo t_i las tensiones aplicadas en cada dirección. Debido a la práctica incompresibilidad de los elastómeros, la red mantiene constante su volumen y por lo tanto los ratios de extensión cumplen la regla

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (10)$$

Como resultado, la relación esfuerzo-deformación se vuelve:

$$t_1 = \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} - p \quad (11)$$

donde p corresponde a una posible presión hidrostática (que no tiene ningún efecto sobre un sólido incompresible). De esta forma, solo diferencias de tensión pueden ser escritas explícitamente.

$$t_1 - t_2 = \frac{NAr^2}{3} (\lambda_1^2 - \lambda_2^2) \quad (12)$$

Se acostumbra presentar estos resultados en términos de la fuerza de tensión actuando sobre una pieza de prueba de sección transversal en reposo A_o , donde:

$$\frac{f}{A_o} = \frac{t}{\lambda} \quad (13)$$

Hasta ahora, se ha demostrado que la deformación de una simple molécula sigue una relación lineal esfuerzo-deformación (ecuación (1)), pero la red se comporta de manera no lineal. Es más, la no linealidad de la deformación en elastómeros depende del tipo de deformación impuesta. En cizalle puro, se estima que la relación es lineal con pendiente G (módulo de cizalle):

$$t_{12} = G\gamma \qquad G = \frac{NAr^2}{3} \qquad (14)$$

donde γ corresponde a la cantidad de deformación (dx/dy).

Todas las relaciones desarrolladas derivan de la ecuación (8), por lo que solo son válidas para deformaciones moderadas, es decir, deformaciones lo suficientemente pequeñas para que las tensiones de las cadenas estén relacionadas linealmente con su distancia promedio entre extremos, r (por ecuación (1)). Desafortunadamente, no se pueden formular relaciones simples correspondientes para W usando la ecuación (5), la relación para grandes deformaciones de las cadenas constituyentes, en donde reaparece el parámetro de rigidez molecular. En su lugar, una serie de aproximaciones deben aplicarse, como en la ecuación (6), para obtener una buena aproximación del comportamiento de la red a deformaciones grandes.

2.3.3 Teoría del continuo de la elasticidad de elastómeros

Un tratamiento general para las relaciones esfuerzo-deformación para sólidos elastoméricos fue desarrollada por Rivlin, asumiendo que el material es isotrópico en el comportamiento elástico en el estado no deformado y que es incompresible a granel. Esta teoría no hace ninguna referencia a la estructura molecular.

Consideraciones de simetría sugieren que medidas apropiadas de deformación son establecidas a través de tres invariantes de deformación:

$$\begin{aligned} J_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3 \\ J_2 &= \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_1^2\lambda_3^2 - 3 \\ J_3 &= \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 - 1 \end{aligned}$$

Cabe destacar que para un material incompresible J_3 es igual a cero, por lo que solo dos medidas independientes de deformación permanecen, J_1 y J_2 . De esta forma, la densidad de energía de deformación W sólo depende de estas dos variables:

$$W = f(J_1, J_2) \qquad (15)$$

Es más, para producir relaciones esfuerzo-deformación lineales a bajas deformaciones, W debe ser inicialmente de segundo orden en las deformaciones e_1, e_2, e_3 . Así, la forma más simple de deformación es:

$$W = C_1 J_1 + C_2 J_2 \quad (16)$$

donde C_1 y C_2 son coeficientes elásticos, cuya suma es igual a la mitad del módulo de corte G . La ecuación (16) es llamada ecuación de Mooney-Rivlin.

Al hacer una expansión de la ecuación (16) como serie de potencias de $e = \lambda - 1$, se encuentra que se incluyen todos los términos en e^2 y e^3 . Por lo que hay buena correlación con resultados experimentales a bajas deformaciones, para valores de e hasta 10% o 20%, donde las potencias mayores de e son despreciables. Sin embargo, para valores grandes de e , digamos 100% o más, ya no es posible aplicar esta ecuación porque deja de ser válida.

3. DISEÑO DE LOS MÓDULOS Y SISTEMA

3.1 Definiciones preliminares

Los módulos blandos son diseñados tomando en consideración las siguientes características mostradas en la Tabla 2:

Tabla 2. Características preliminares módulos blandos

Forma	Cubo
Dimensiones externas [mm]	20x20x20
Función	Expansión al doble del volumen inicial
Accionamiento	Aire comprimido
Tipo	WBL
Arquitectura	Red
Material	Resina de silicona

Lo anterior determina la forma general y el accionamiento de los módulos, por lo que se diseña la forma en detalle y el sistema de acoplamiento para cada alternativa. Se escoge la forma de cubo por ser una geometría sencilla, con simetría en 90°, caras planas que facilitan el acoplamiento de dos unidades y además es una geometría considerada en el software de simulación a utilizar. Las dimensiones son seleccionadas tratando de minimizar el tamaño y el peso de los módulos, ya que se busca poder acoplar la mayor cantidad posible de módulos y también un menor tamaño de módulo entrega mayor resolución a la estructura que forman, pero también se intenta que sean fáciles de fabricar y que tengan suficiente espacio para alojar dispositivos electrónicos. Se escoge la forma de accionamiento de entre las tres típicas usadas en la robótica blanda, descartando los actuadores dieléctricos elastoméricos por ser más difíciles de adquirir e integrar a dispositivos pequeños, y las aleaciones con memoria por no permitir un accionamiento preciso. La resina de silicona a utilizar corresponde al que se encuentra disponible en el laboratorio, además de ser una resina especial para el moldeo de figuras, muy flexible de curado rápido y a temperatura ambiente.

La estructura a construir con los módulos será similar a las que se simulan en el software VoxCad, y se establece que serán formadas por un máximo de ocho unidades.

3.2 Diseño de módulos

De acuerdo a las especificaciones descritas en la sección 3.1, el diseño apunta a la expansión del módulo hasta el doble del volumen inicial. Además, tomando en cuenta la comparación entre sistemas de acoplamiento revisada en los antecedentes (ver Tabla 1), se decide que la opción más conveniente es utilizar imanes permanentes de neodimio (alta fuerza de atracción). La elección se justifica al buscar sistemas de acoplamiento compatibles con la naturaleza blanda del cuerpo del módulo, que pudieran implementarse para su tamaño y además ofreciera la mayor fuerza de unión posible. Además de estos criterios, se prefirió sistemas que no consumieran energía para mantener el acoplamiento, que fueran sencillos y livianos (no es deseable agregar masa), y que no se vea afectado negativamente con la expansión del módulo.

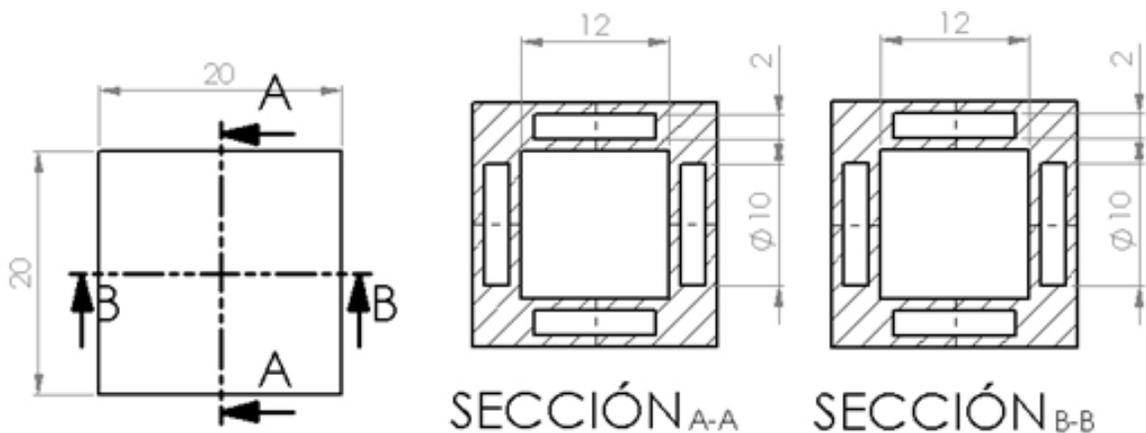


Figura 14 – Diagrama módulo con cortes transversales

La Figura 14 muestra a la izquierda un módulo visto de lado y los cortes A-A y B-B permiten notar que al interior del cubo, centrado, hay una cavidad cúbica de 12 mm de lado y en cada una de las 6 paredes se encuentra centrada en la cara una cavidad en forma de cilindro de 10 mm de diámetro y 2 mm de espesor. La cavidad cúbica del centro se encuentra diseñada para alojar el aire comprimido que expande el módulo al ejercer presión, y en cada cavidad cilíndrica se coloca un imán para el sistema de acoplamiento.

El sistema de acoplamiento se diseña de forma que todos los cubos sean iguales y sea sencillo armar estructuras, usando imanes orientados de manera tal que cada cubo posee tres caras positivas y tres caras negativas, con las caras opuestas de distinto signo. A pesar de que el uso de imanes implica que las caras tendrán género para la conexión y que eso constituye una desventaja para las posibilidades de reconfiguración, la distribución propuesta intenta minimizar lo anterior. La Figura 15 muestra un cubo con esta distribución.

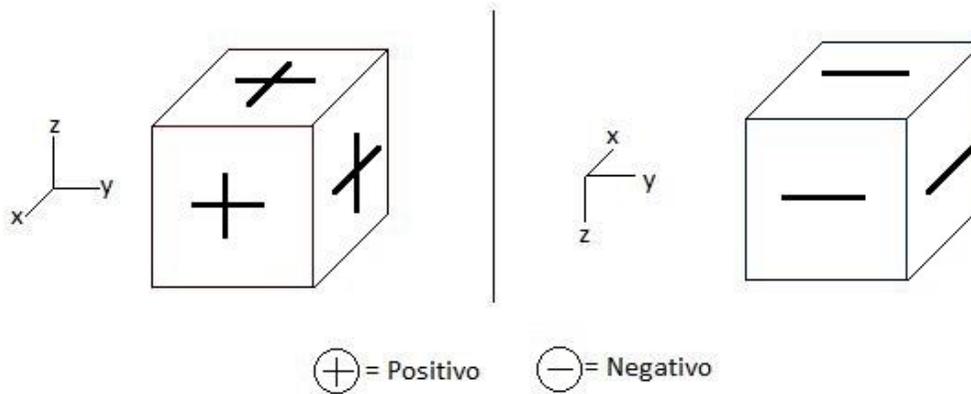


Figura 15 – Distribución sistema de acoplamiento

El aire comprimido se inyecta a la cámara central del módulo por uno de sus vértices usando una manguera flexible, de forma de no entorpecer el acoplamiento de dos o más módulos.

Debido a la fuerza de los imanes y el tamaño reducido del módulo, un imán en una cara se atrae al de una cara adyacente con facilidad y deforma la silicona, haciendo colapsar dos caras del módulo cerca del centro. Este problema se corrige incorporando al diseño un marco plástico rígido para los imanes, evitando que los imanes se den vuelta al interior de las cavidades de las caras y que sean atraídos por los imanes adyacentes.

El diseño del marco rígido se muestra en las Figuras 16 y 17, mostrando vistas isométricas y cortes, respectivamente. Dentro del marco cabe de forma ajustada un imán de 6 mm de diámetro, en la superficie cilíndrica del marco hay una abertura de 6 mm para admitir el imán y por el lado contrario un pequeño agujero de 1 mm de diámetro, por donde el aire puede escapar al introducir el imán y también permite eyectar el imán utilizando una aguja o un alambre delgado. Las paredes superior e inferior del marco tienen 0.5 mm de espesor para reducir al máximo la distancia entre imanes en el acoplamiento de dos módulos (atracción longitudinal), pero se utiliza un diámetro exterior de 11 mm para evitar la atracción radial entre imanes en caras adyacentes y para que el marco quede firme en la cavidad del módulo. El agujero superior cumple la sencilla función de indicar qué lado del marco debe mirar hacia afuera del módulo, además de permitir distinguir con rapidez si el marco se encuentra vacío.

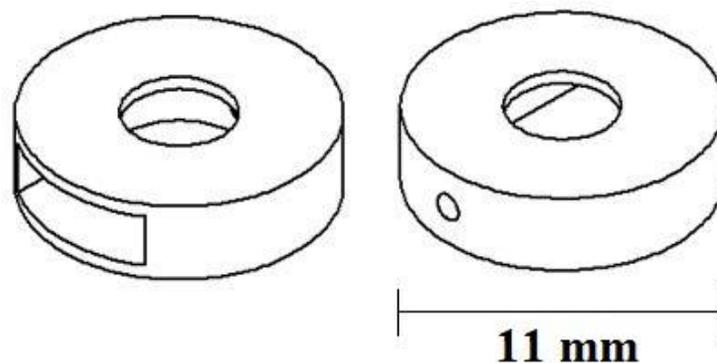
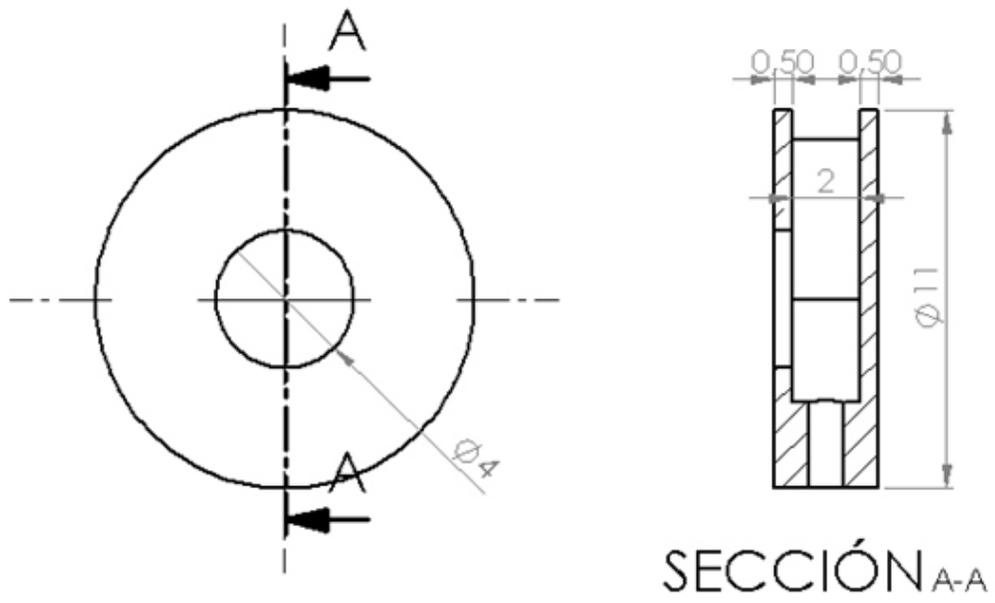
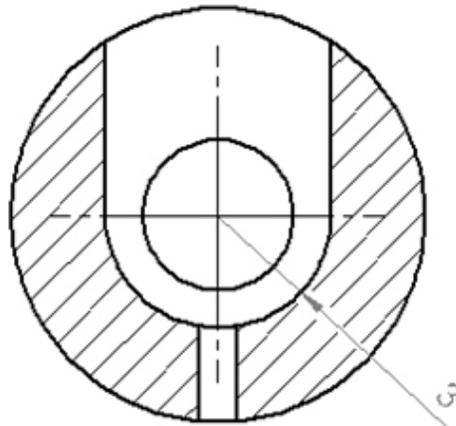
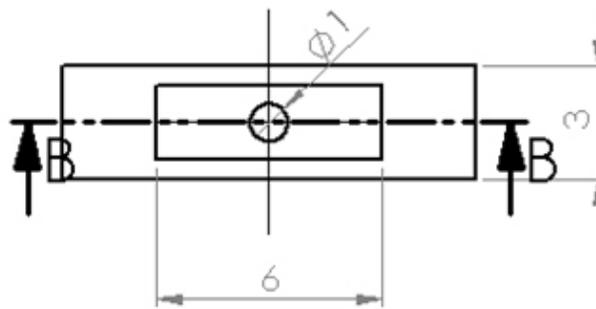


Figura 16 - Dibujos isométricos Marco Imán



(a)



SECCIÓN B-B

(b)

Figura 17 - Vistas Marco Imán: (a) Superior, (b) Frontal

La Figura 18 muestra un corte transversal de un módulo completo (cuerpo blando de silicona con un conjunto marco-imán en cada cara).

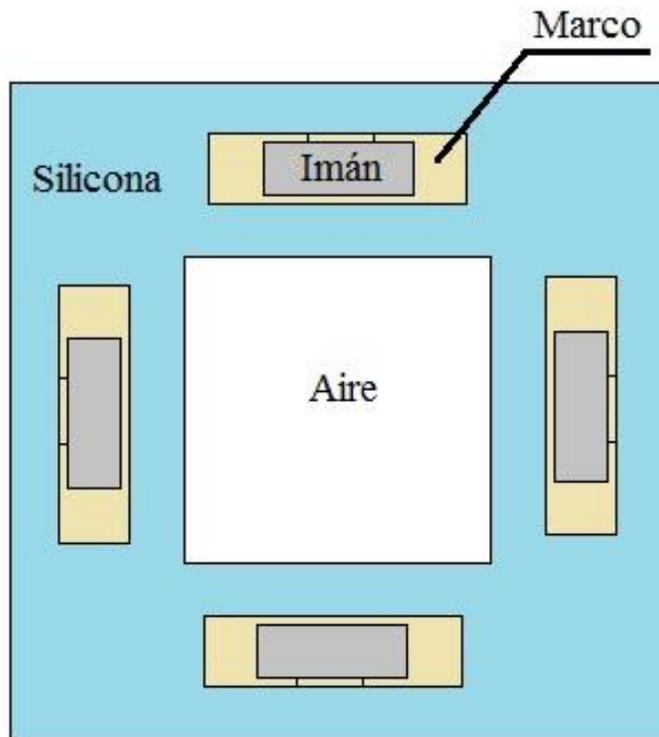


Figura 18 – Corte transversal módulo completo

Para la fabricación se diseñan moldes en SolidWorks, y se adjuntan los planos en el Anexo A.

Se adjunta información técnica sobre los imanes de neodimio utilizados en el Anexo B.

3.3 Diseño del sistema

3.3.1 Simulación

El software VoxCad es un software libre capaz de modelar y analizar voxels (elementos de volumen discreto) y puede ser utilizado para el diseño de robots blandos, debido a que puede procesar grandes deformaciones, además de detección de colisiones, distintos materiales y actuación volumétrica. Lo último es especialmente conveniente para simular el sistema robótico a fabricar, ya que el rasgo característico de los módulos es su expansión volumétrica para generar movimiento. El software considera que la actuación volumétrica es periódica, simulándolo como expansión térmica lineal y variando la temperatura ambiente con un periodo dado. Es posible definir distintos grupos de unidades para que tengan una expansión desfasada respecto al tiempo inicial de simulación.

Para explorar el potencial de un sistema modular blando se prueban tres distintas estructuras formadas por ocho módulos con el mismo programa de actuación, escogido en forma arbitraria: activación del conjunto de módulos como un pulso, es decir, se expanden (y vuelven al tamaño inicial) uno a uno los módulos de manera similar a la que se muestra en la Figura 19.

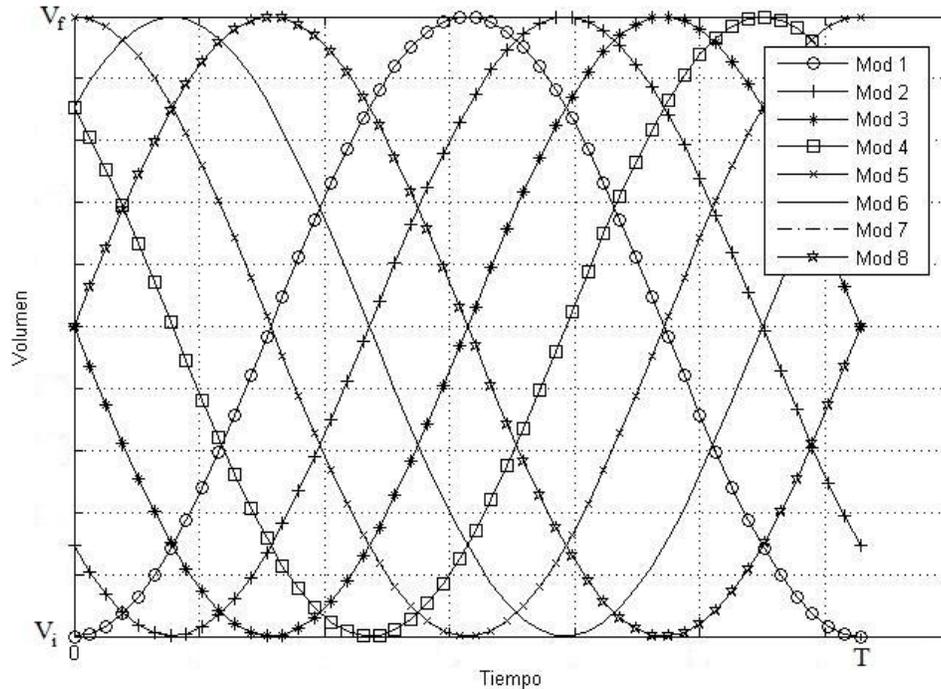


Figura 19 – Volumen de los módulos simulados en el tiempo. V_i indica el volumen inicial, V_f el final y T corresponde al periodo de la variación de temperatura (y de la expansión).

El primer sistema es muy sencillo y consta de un cuerpo formado simplemente por la unión unidireccional de los ocho módulos, uno al lado del otro y en orden de expansión, formando una “cadena” (ver Figura 20).

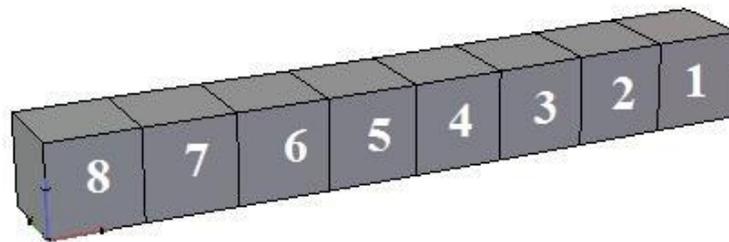


Figura 20 – Sistema 1, de ocho módulos formando una línea

Al activar la secuencia de expansión de la Figura 19 en el Sistema 1, se obtiene un movimiento peristáltico que permite el avance de la cadena en dirección del módulo 1 como muestra la Figura 21.

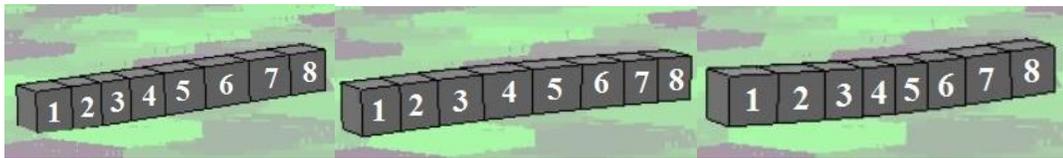


Figura 21 – Secuencia de movimiento simulada para Sistema 1

El segundo sistema tiene forma de cubo (ver Figura 22), con dos “pisos” de módulos. Al activar la misma secuencia de activación se obtiene el movimiento de la Figura 23.

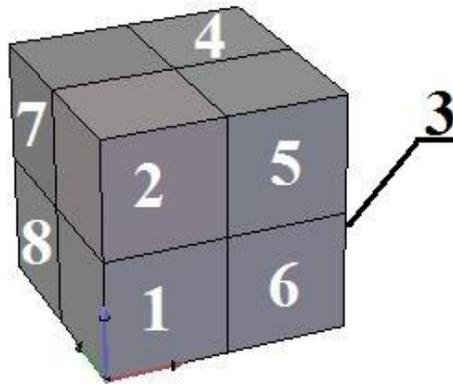


Figura 22 – Sistema 2, de ocho módulos formando un cubo

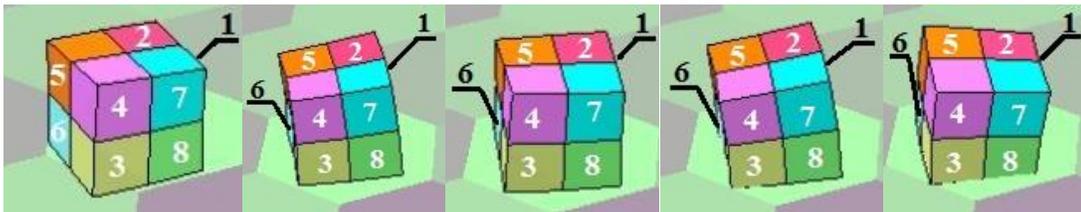


Figura 23 – Secuencia de movimiento simulada para Sistema 2

El tercer sistema tiene la forma que indica la Figura 24, está formado por ocho módulos como los anteriores y tiene tres “pisos” de módulos. La secuencia de activación genera el movimiento mostrado en la Figura 25.

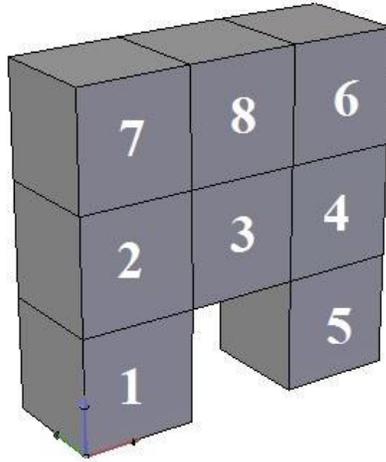


Figura 24 – Sistema 3, de ocho módulos y tres pisos



Figura 25 – Secuencia de movimiento simulada para Sistema 3

Los desplazamientos y velocidades instantáneas de cada sistema se muestran en los gráficos de las Figuras 26 y 27, respectivamente.

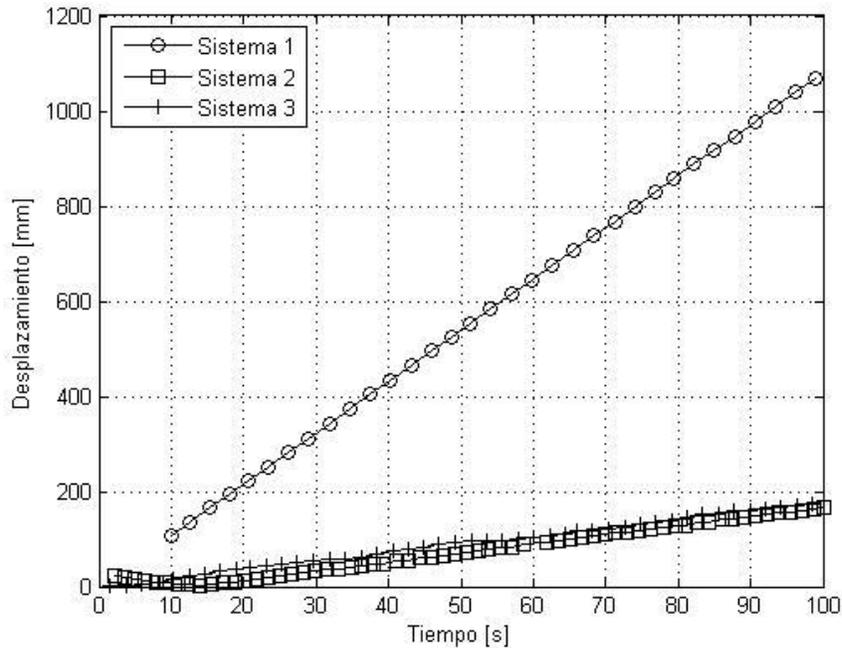


Figura 26 – Desplazamiento del centro de masa de sistemas, en un periodo de 100 segundos

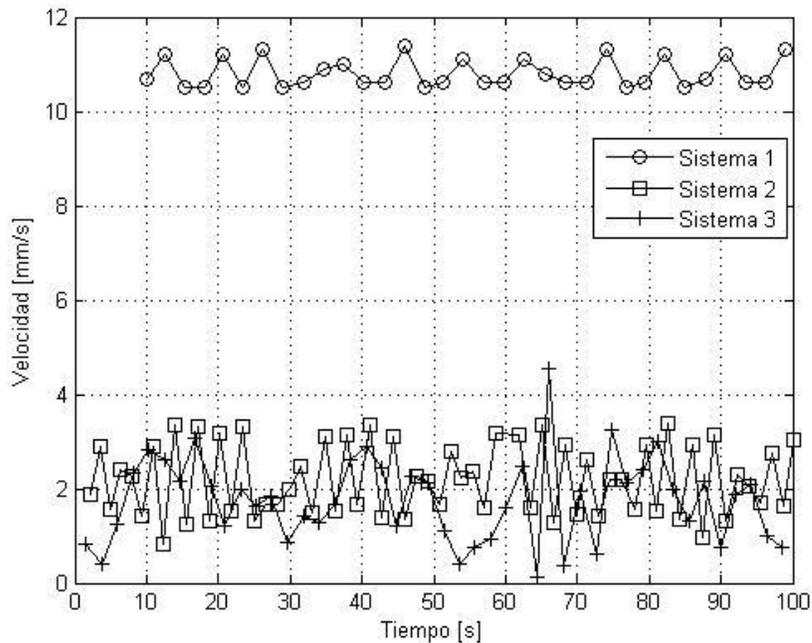


Figura 27 – Velocidad instantánea del centro de masa de sistemas, en un periodo de 100 segundos

Según las simulaciones, el Sistema 1 es el que logra un mayor desplazamiento y tiene mayor velocidad que los otros. Los sistemas 2 y 3 tienen un comportamiento similar en desplazamiento y velocidad, siendo un poco más efectivo en desplazamiento el Sistema 3, ya que el Sistema 2 tiende a girar mientras avanza.

Estos modelos muy probablemente no se replicarán en la realidad por parámetros que fueron asumidos de manera arbitraria, pero se espera que la simulación entregue resultados cualitativos aplicables a la realidad. Lo anterior se debe a la suposición de algunos parámetros como el coeficiente de roce estático y dinámico (en particular, para estos parámetros se utiliza el predeterminado).

3.3.2 Circuito de control

Los módulos deben ser alimentados con aire comprimido para su actuación, por lo que el diseño del sistema debe incluir el circuito que controla las entradas y salidas de aire para cada módulo.

Se desea que la actuación de los módulos sea independiente para cada uno. Para cumplir lo anterior se conecta a cada línea neumática (manguera conectada al módulo) un micro compresor y una válvula solenoide. El control de estos componentes se realiza mediante un Arduino Leonardo, que activa relés para encender o apagar un compresor o solenoide según corresponda. Debido a que las salidas digitales del Arduino son de bajo amperaje, se hace necesario utilizar transistores para amplificar la señal y activar los relés. La Figura 28 muestra un diagrama esquemático del circuito y la Figura 29 del circuito neumático.

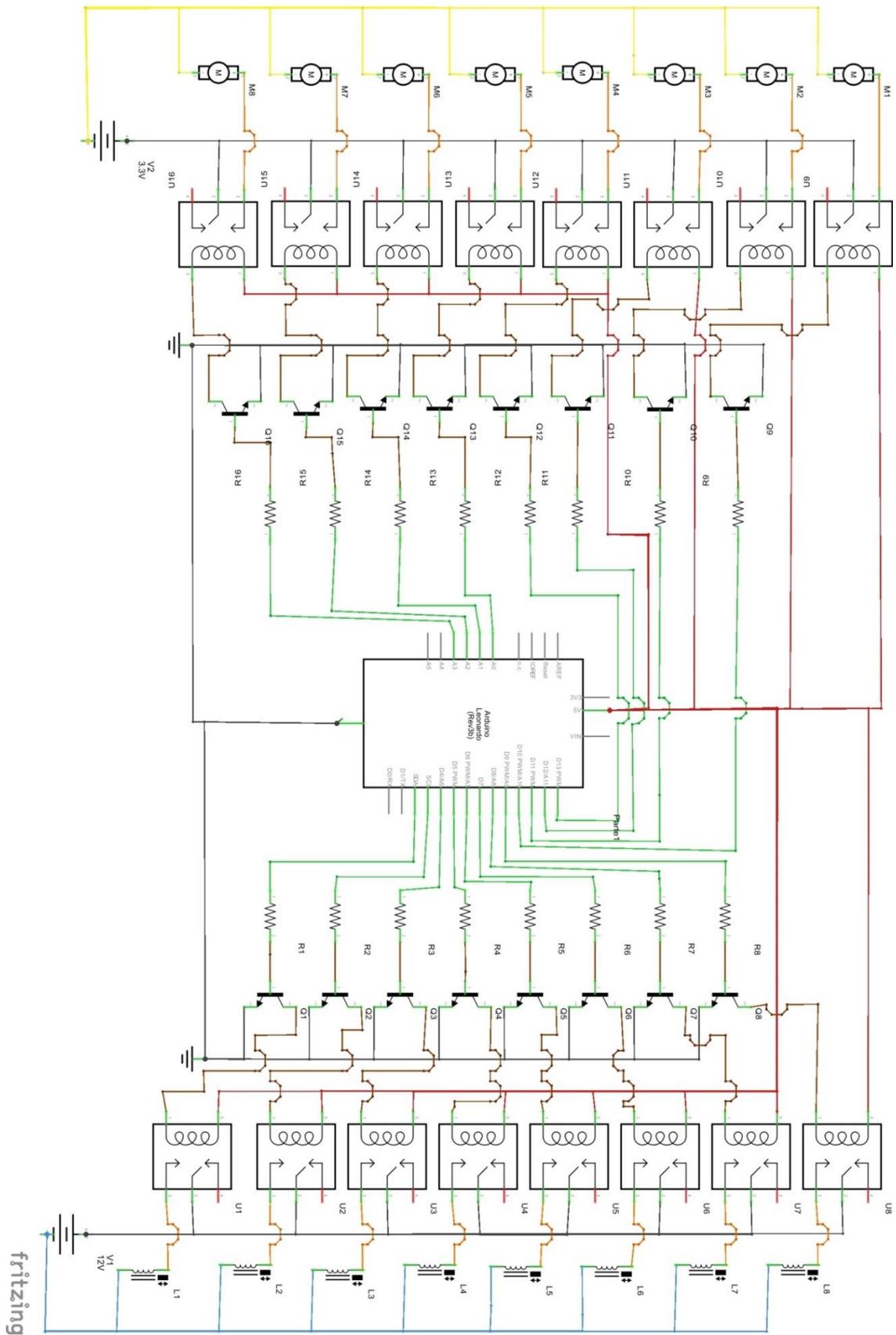


Figura 28 – Circuito eléctrico de control de sistema

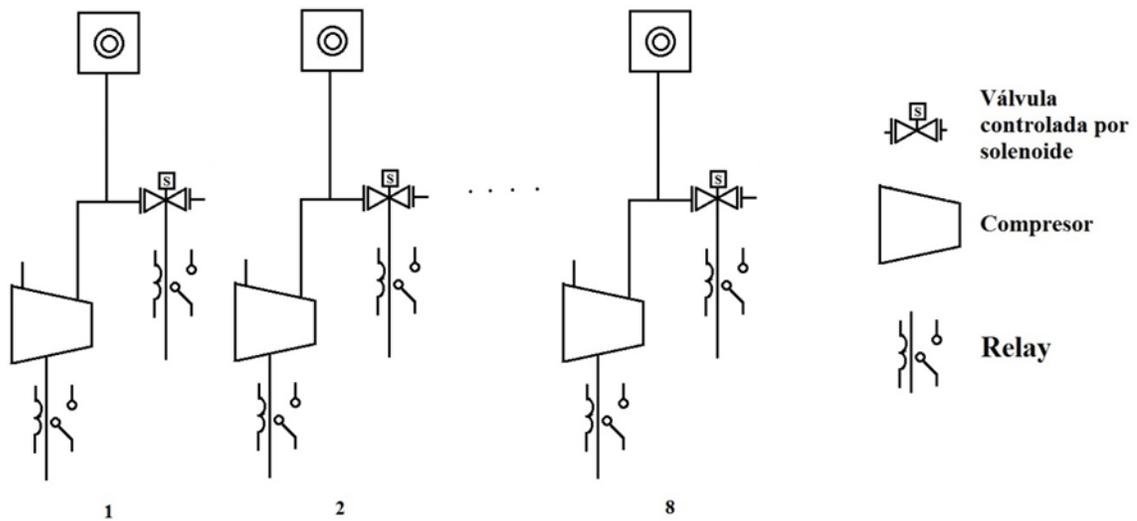


Figura 29 – Circuito neumático de sistema

Así es posible cargar al Arduino programas con secuencias de activación, en particular uno similar al utilizado en VoxCad. Sin embargo, los solenoides a utilizar funcionan como una válvula on/off, lo que genera que la evacuación de aire para regresar al volumen inicial sea prácticamente instantánea. De esta forma, el gráfico de volumen en el tiempo para cada módulo sería similar a la Figura 30.

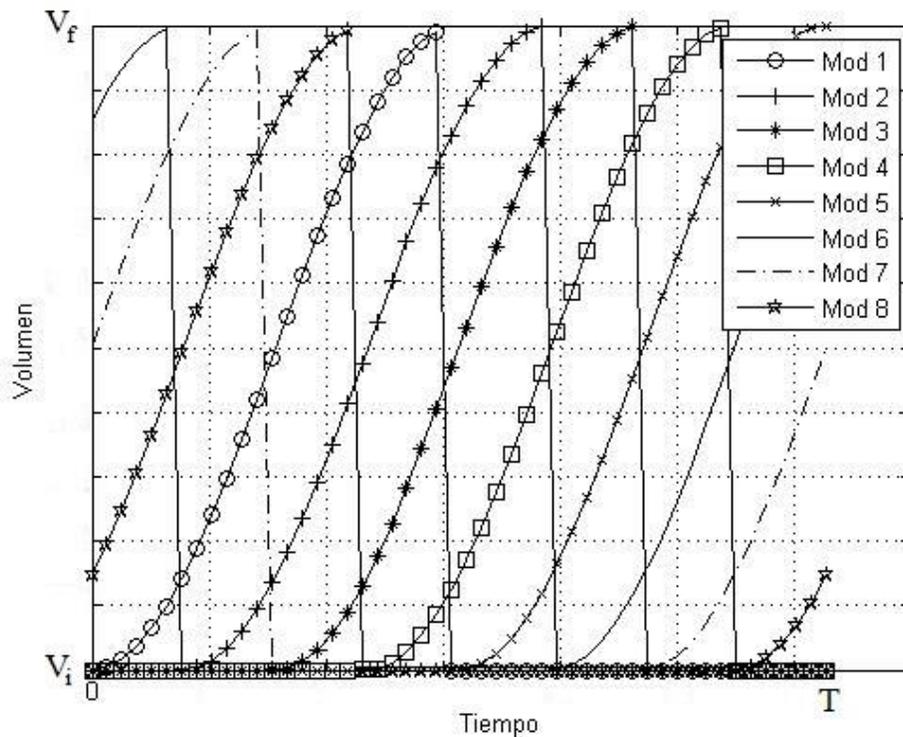


Figura 30 – Programa de activación implementado con solenoides. Cada curva muestra el volumen en el tiempo de un módulo (ver leyenda), donde V_i indica el volumen inicial, V_f el final y T corresponde al tiempo de un ciclo de activación.

Para aumentar las posibilidades de movimiento del sistema, se adapta la secuencia anterior para que siempre haya al menos un módulo completamente expandido, y agregar pausas entre expansiones que permitan al sistema real acomodarse (ver Figura 31).

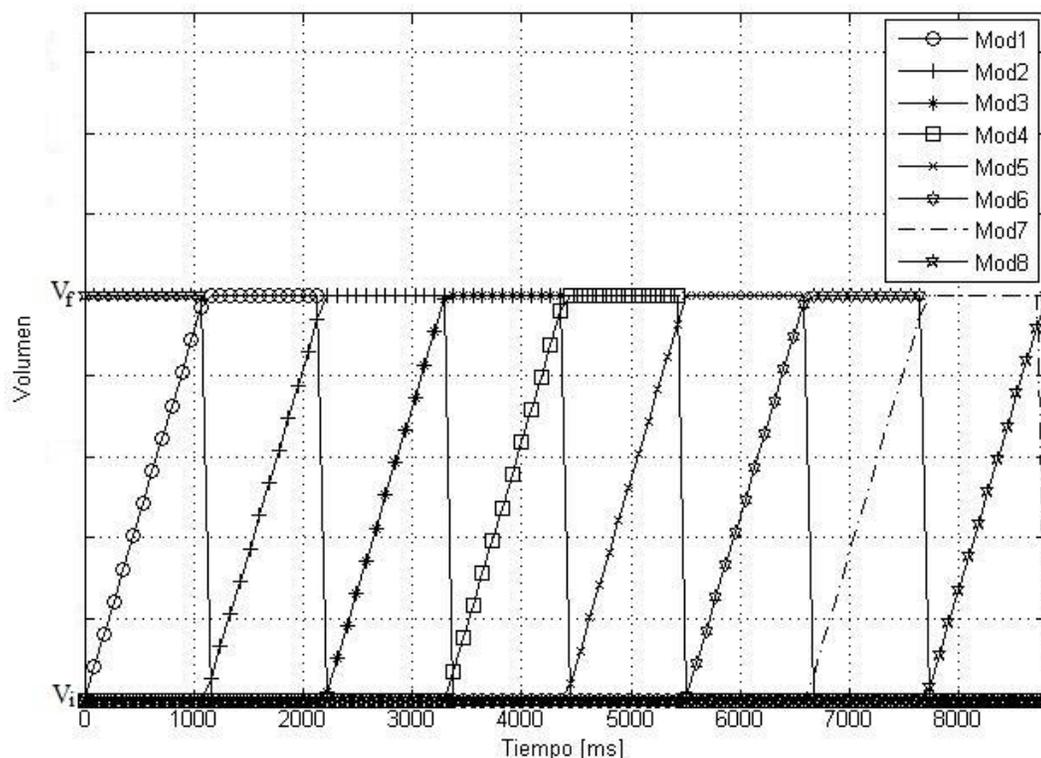


Figura 31 – Secuencia real de expansión estimada, de periodo 8,8 segundos. Cada curva muestra el volumen en el tiempo de un módulo (ver leyenda), donde V_i es el volumen inicial y V_f el volumen máximo alcanzado en la expansión.

El volumen alcanzado por cada módulo depende del compresor que se utilice y de las pérdidas de presión en la línea neumática, pero el tiempo de expansión (1 segundo) está pensado para que la deformación en cada cubo sea alrededor del doble del volumen inicial. Además, las curvas de la Figura 31 pretenden mostrar con precisión el momento en el cual se inicia la expansión y el escape de aire, pero la expansión lineal corresponde a una simplificación y no a la curva de expansión real.

El Anexo C incluye los esquemáticos del circuito, listado de componentes y el código de la secuencia de activación para Arduino.

4. FABRICACIÓN DE MÓDULOS

En este capítulo se trata la metodología de fabricación de los módulos, para lo cual se utilizan moldes derivados del diseño del capítulo anterior y cuyos planos se encuentran en el Anexo A.

Las piezas para los moldes 1 y 2 (Figuras 32 y 33) y los marcos para imán se imprimen en una impresora 3D tipo SLS, es decir, curado de fotopolímero mediante aplicación de luz UV sobre capas líquidas, en particular una Objet30 Scholar de Stratasys. Esta máquina se caracteriza por su alta precisión, capaz de hacer capas de 28 micrones de espesor. Se justifica el uso de esta impresora por la precisión requerida en las piezas, que son pequeñas y deben tener un ensamble ajustado para evitar la filtración de resina líquida en el caso del molde, y para evitar el desplazamiento o la caída del imán en ciertas posiciones en el caso del marco.



Figura 32 – Molde 1 desarmado parcialmente. Al cubrir con la pieza de la derecha el molde es posible obtener un cubo hueco de espesor 4 mm al que le falta la cara superior, y con bolsillos en forma de discos en las paredes.



Figura 33 – Molde 2 desarmado. El disco del centro encaja en el centro del molde y al tapar con la pieza de la izquierda es posible obtener una lámina cuadrada de 20 mm de lado y 4 mm de espesor, con un bolsillo en forma de disco en el centro.

Se utiliza resina de silicona Ecoflex 00-30 de Smooth-On, que tiene la ventaja de ser muy flexible y ser especial para modelar figuras. Esta resina es suministrada en forma líquida en dos recipientes separados, parte A y parte B, que deben ser mezclados en partes iguales de masa o volumen y tiene un tiempo de curado de aproximadamente 4 horas a temperatura ambiente (hoja de datos en Anexo B). Con esta resina y los moldes impresos se sigue el siguiente proceso de fabricación para un módulo (Figura 34):

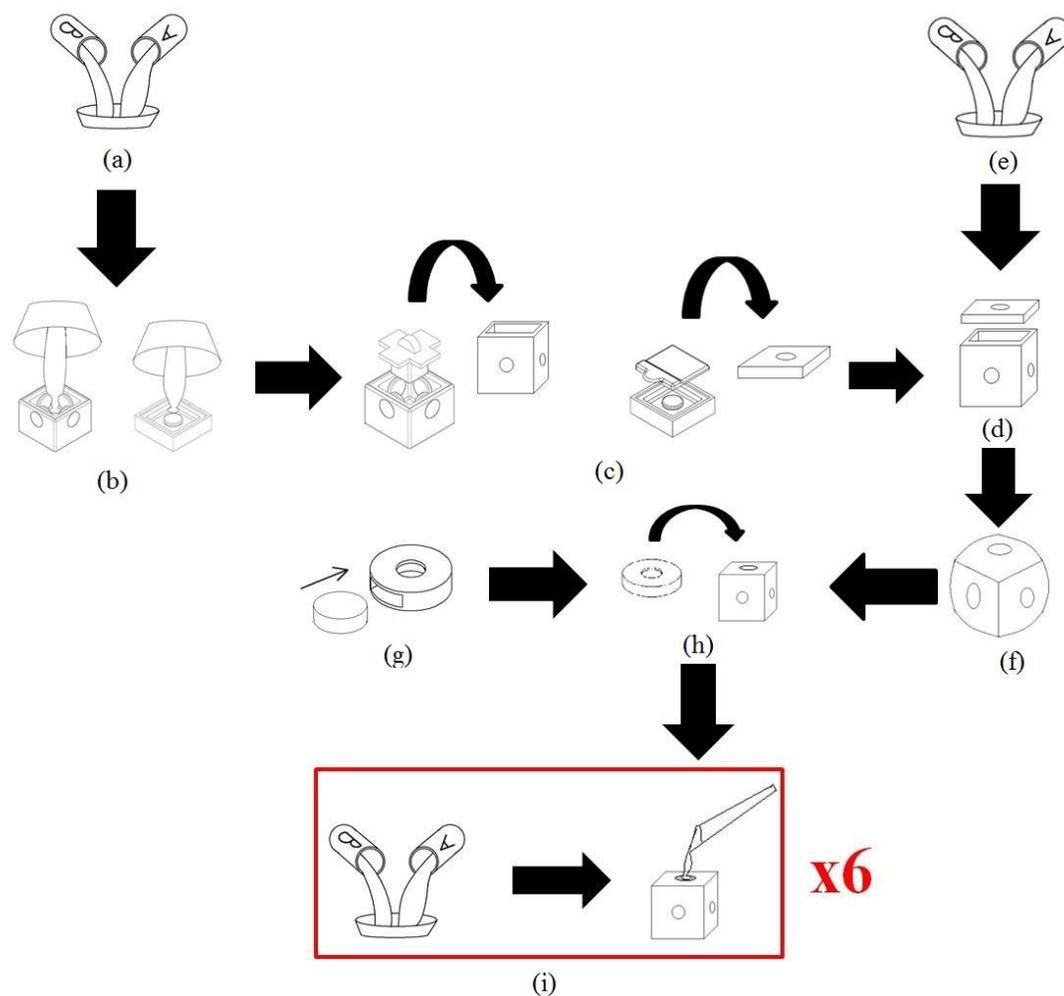


Figura 34 – Proceso de fabricación

- (a) Mezclar resinas: 50% Parte A y 50% Parte B, revolver bien con paleta.
- (b) Echar con la paleta a los moldes hasta que estén llenos.
 - Esperar alrededor de 4 horas para que cure la resina.
- (c) Desmoldar las piezas de silicona de los moldes. Cortar rebabas que hayan quedado (ver Figura 35).
- (d) Mezclar más resina como en parte (a).
- (e) Pegar piezas, colocando mezcla entre ambas superficies (ver Figura 36).

- Esperar alrededor de una hora para que seque la “soldadura”.
- (f) [TEST] Comprobar que no hayan fugas en la cámara interna.
- (g) Insertar los seis imanes en su respectivo marco
- (h) Colocar conjunto imán-marco en cavidades de las caras del cuerpo blando (ver Figura 37).
- (i) Mezclar más resina y colocar una capa sobre un marco. Esperar alrededor de una hora para que seque y repetir para cada cara.



Figura 35 – Desmolde y corte de rebabas. (i) Desmolde y corte de rebabas para el cuerpo del molde 1. (ii) Desmolde y corte de rebabas para el cuerpo del molde 2.

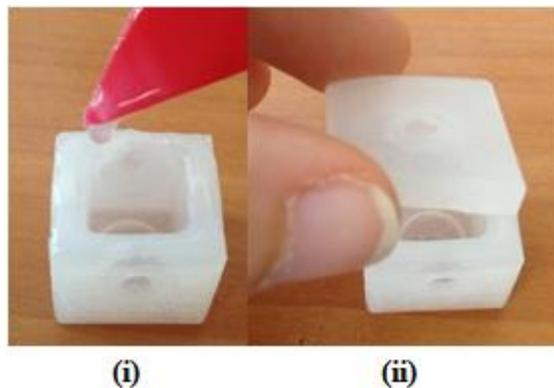


Figura 36 – Soldadura de silicona para unión de partes. (i) Paleta colocando silicona líquida sobre borde de cuerpo blando. (ii) Unión de partes

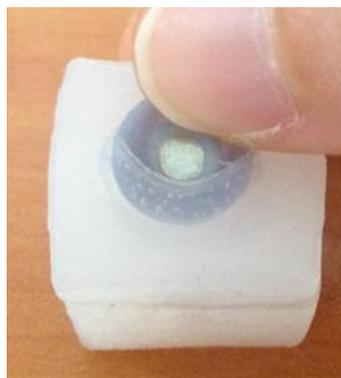


Figura 37 – Inserción de conjunto imán-marco en “bolsillo”

Con lo anterior termina la fabricación, y si todo el proceso fue exitoso entonces es posible inflar el módulo sin que el aire se fugue ni que los imanes se desprendan. La Figura 38 muestra un módulo terminado y uno cortado por la mitad.



Figura 38 – Corte transversal de cuerpo blando (izq) y módulo terminado (der).

Se describe paso a paso y con detalle la fabricación para un módulo en el Anexo D.

5. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Para caracterizar el comportamiento de los módulos se realizan los siguientes ensayos experimentales:

- Número máximo de módulos conectados verticalmente
- Número máximo de módulos conectados horizontalmente
- Curva estática presión-volumen de expansión
- Resistencia a la presión
- Respuesta al impulso
- Construcción y prueba de sistemas simulados

Los primeros dos ensayos miden la escalabilidad del sistema, que es la característica que permite determinar cuánto puede crecer el sistema (cuántos módulos pueden permanecer conectados a la vez).

La medición de la curva presión-volumen permite caracterizar la deformación de cada módulo y también entrega los parámetros de operación del sistema. De forma similar, registrar la resistencia máxima a la presión de un módulo indica también la resistencia máxima del sistema y permite conocer las limitaciones en volumen y presión.

La respuesta al impulso de presión es un ensayo que permite conocer la rapidez del material frente a una entrada violenta de aire comprimido, es decir, el tiempo que tarda el material en deformarse. Esta medición es útil para limitar la rapidez de actuación.

Finalmente, la construcción y prueba de los sistemas simulados tiene por objetivo medir el desplazamiento real de los sistemas que fueron simulados para comparar con las obtenidas en la simulación.

Todos los anteriores son parte de la información técnica básica de un dispositivo robótico, y pretenden ser útiles para el diseño de una aplicación.

5.1 Número máximo de módulos conectados vertical y horizontalmente

Este par de pruebas tiene el objetivo de medir la escalabilidad del sistema modular (cuántos módulos pueden componer un sistema), probando la capacidad del sistema de acoplamiento de soportar el peso de más unidades.

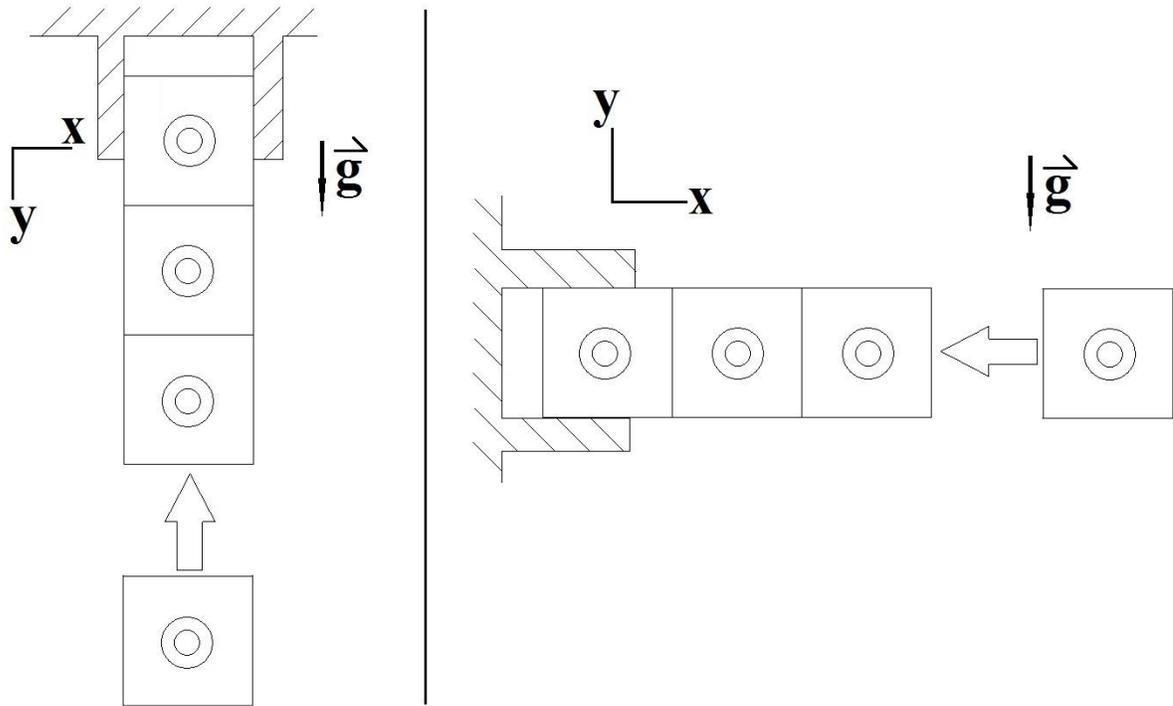


Figura 39 – Prueba de número máximo de módulos conectados: verticalmente (izq.) horizontalmente (der.)

Para este ensayo se debe sostener firmemente un módulo por sus caras laterales a la altura del imán y conectar módulos en forma vertical u horizontal (ver Figura 39), según corresponda, uno a uno hasta que la estructura colapse, es decir, se separe uno o más módulos. El valor extraído de este ensayo será el número N de módulos que puedan mantenerse conectados tal que al intentar conectar el módulo N+1 la estructura colapsa. Para este ensayo se conectan los módulos sin las mangueras conectadas.

5.2 Curva estática presión-volumen

Debido a que los módulos son accionados por presión, se hace necesario conocer la relación entre presión aplicada y volumen de la unidad. De esta prueba se obtiene una curva Presión-Volumen correspondiente a la relación de estas dos variables para el módulo.

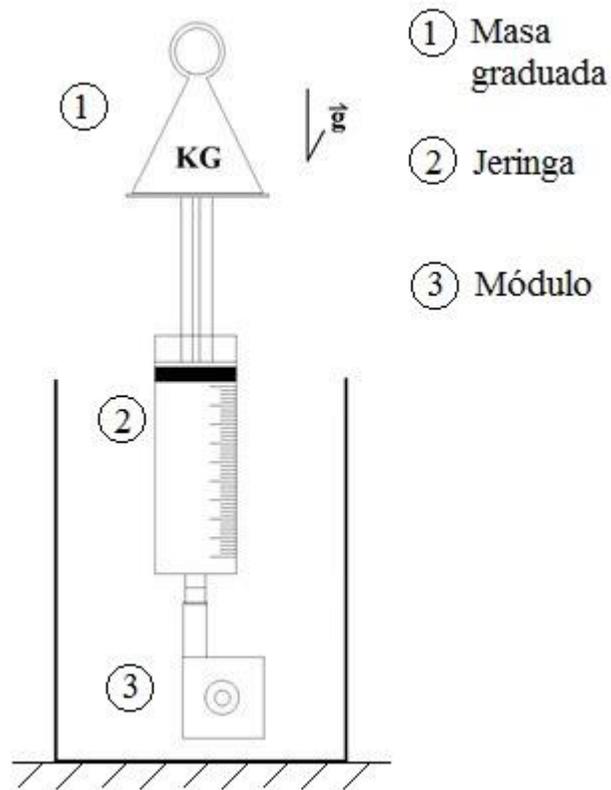


Figura 40 – Montaje para curva estática presión-volumen

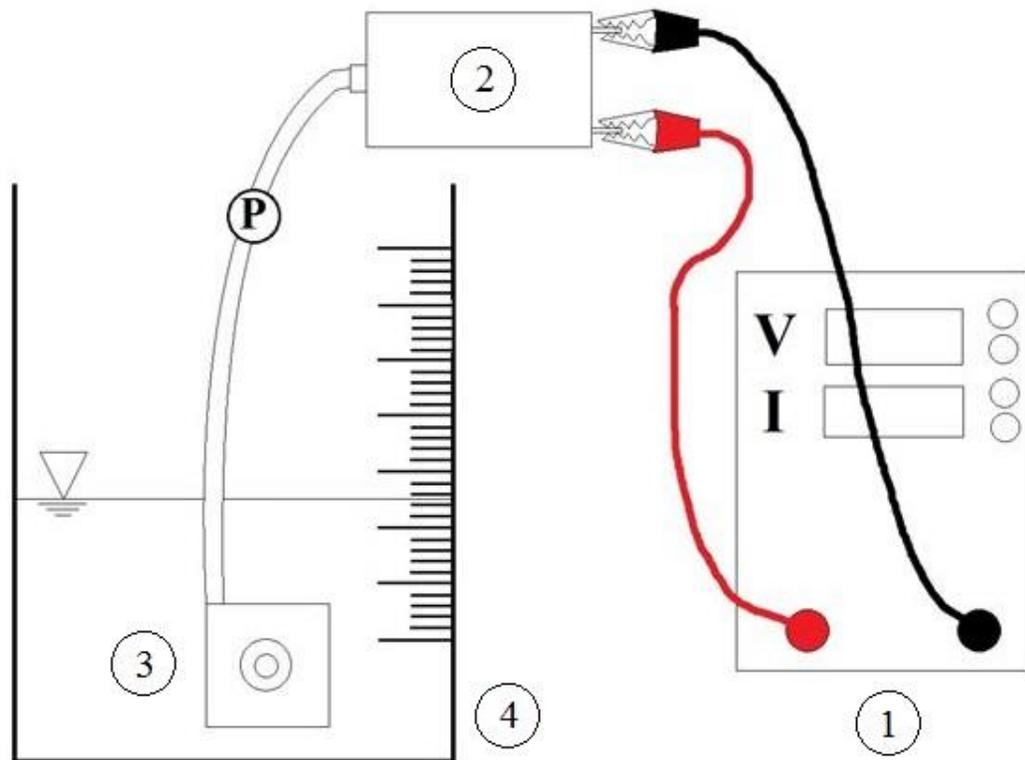
Para esta prueba resulta muy conveniente llenar de agua el módulo e inyectar más agua con una jeringa graduada, dentro de un recipiente para no salpicar (ver Figura 40). La jeringa es cargada con una masa conocida (un recipiente con agua, por ejemplo), por lo que se obtiene fácilmente la presión al medir el área del émbolo, y el volumen que aumenta el módulo es el mismo volumen de agua desplazada (lectura directa desde la jeringa). Para el montaje es útil emplear un soporte que mantenga vertical la jeringa.

Para tomar las medidas se debe hacer una tabla con presiones e ir aplicando más presión mientras se anota manualmente el volumen desplazado de agua en la jeringa. Se debe observar el estado del módulo en cada punto, para verificar que soporta la presión aplicada sin dañarse.

5.3 Resistencia a la presión

Se espera que los módulos no presenten rotura durante la prueba para obtener la curva estática presión-volumen, por lo esta prueba tiene el objetivo de conocer la presión y volumen máximos antes de la falla del módulo.

Esta prueba se realiza con el módulo sumergido en agua y en un recipiente graduado en milímetros. En vez de inyectar agua con una jeringa, se utiliza una bomba y se usa aire comprimido, para lograr una mayor presión (ver Figura 41).



① Fuente de poder

③ Módulo

② Compresor

④ Vaso graduado

Figura 41 – Montaje para resistencia a la presión

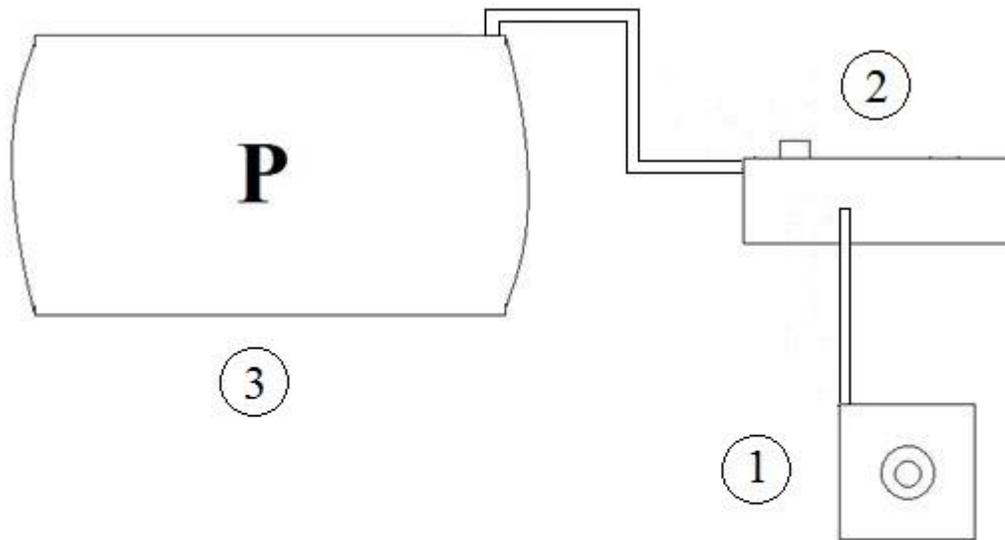
A diferencia del experimento para registrar la curva presión-volumen, el módulo y la manguera se encuentran con aire en su interior, y se sumerge el módulo para poder monitorear el cambio en volumen, indicado en el nivel del agua del recipiente. El aire es inyectado a presión por una bomba alimentada por una fuente de poder. Es recomendable grabar la prueba con una cámara, para registrar de forma más precisa el nivel de agua máximo antes de que se produzca la falla. Se considera como falla cualquier rotura del cuerpo blando (sea una membrana interna o externa) o fuga de aire desde el interior, incluyendo las fugas alrededor de la manguera o su desconexión (que puede o no venir acompañado de daño material al módulo).

El nivel del agua, graduado en milímetros, entrega información sobre el volumen que alcanza el módulo al calcular el volumen desplazado de agua. La presión instantánea es medida con un manómetro conectado a la manguera mediante el uso de fittings. Se ajusta el voltaje de la fuente

para que el flujo de aire inyectado por la bomba sea de tal manera que no genere ondas en la superficie del agua.

5.4 Respuesta al impulso

En las pruebas ya explicadas los módulos son sometidos a aumentos paulatinos de presión, suficientemente lentos para que el material pueda deformarse. Durante su servicio, el sistema podría estar sometido a accionamientos bruscos para generar movimientos rápidos. Por lo anterior, es de interés conocer la respuesta del sistema ante un impulso de presión.



- ① Módulo ② Válvula Solenoide
③ Estanque a presión

Figura 42 – Montaje respuesta al impulso

Este experimento se realiza con un estanque a presión conocida, y conectado a un solenoide que controla el paso de aire a través de una manguera al módulo (ver Figura 42). Al activar el solenoide por un periodo corto de tiempo el aire del estanque a presión va hacia el módulo, generando un pulso de presión. El comportamiento del módulo debe ser registrado en video, y mediante su análisis es posible hacer un gráfico deformación-tiempo (se mide la distancia entre dos caras opuestas) que represente la respuesta temporal al impulso ejercido.

5.5 Construcción y prueba de sistema

Este último ensayo consiste en la implementación del circuito descrito en la sección 3.3.2 y la construcción de los sistemas simulados (ver sección 3.3.1). Para cada uno de los sistemas se debe medir el desplazamiento del centro de masa de la estructura para comparar con las simulaciones.

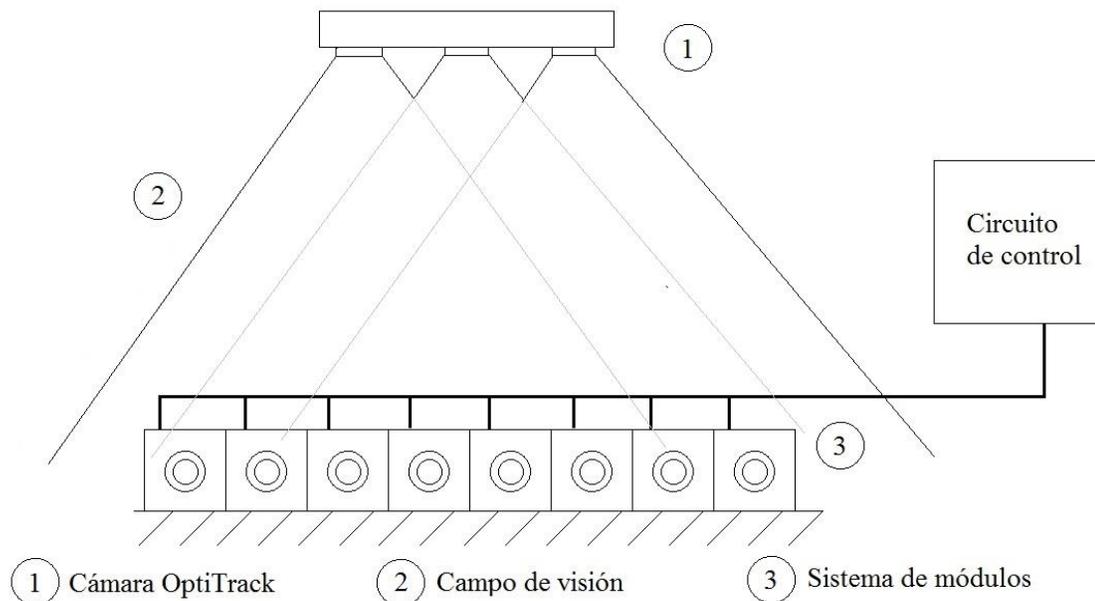


Figura 43 – Montaje para prueba de sistema

La medición de desplazamiento se realiza a través del análisis de coordenadas entregadas por la cámara OptiTrack, especial para el registro de movimientos, que se posiciona en el techo (ver Figura 43). Esta cámara emite luz infrarroja y mide la posición de marcadores reflectantes a 120 fps. Ya que los módulos no reflejan mucho infrarrojo por sí solos, se debe pegar un pequeño trozo de cinta reflectante en la cara superior, quedando así visibles a la cámara. Debido a que las mangueras de los módulos pueden ser detectadas en ciertos ángulos por su reflejo, se debe cubrir la mayor parte de las mangueras.

Luego de configurar los parámetros tal que los marcadores de cada módulo se registran adecuadamente y además no se reciben señales de otros objetos, es posible comenzar la medición alimentando con energía el Arduino con el programa descrito en la sección 3.3.2.

Los datos obtenidos deben ser exportados a otro programa para su análisis y ser graficados, como Excel o Matlab.

6. RESULTADOS

Los módulos fabricados con éxito son sometidos a las pruebas experimentales indicadas en el capítulo anterior. Una unidad de calidad satisfactoria no presenta fugas en toda la superficie de la cámara interna y no sufre rotura de ningún tipo al ser expandido al doble de su volumen. Las características generales de los módulos fabricados son las siguientes:

Tabla 3. Características módulos del sistema robótico blando

Forma externa	Cubo
Dimensiones externas	20x20x20 mm
Sistema de acoplamiento	Imán permanente de neodimio
Materiales	Resina de silicona y fotopolímero RGD240
Conexión neumática	Manguera 3 mm de diámetro
Volumen	8 cm ³
Función	Expansión a 16 cm ³
Masa	10.09 gr
Accionamiento	Aire comprimido
Tipo	WBL
Arquitectura	Red
Capacidad de conexión vertical	8 módulos
Capacidad de conexión horizontal	2 módulos
Volumen máximo¹	125 cc

Además de las características mencionadas, los módulos son capaces de conectarse y expandirse como muestra la Figura 44.



Figura 44 – Seis módulos conectados y expansión del módulo medio superior (mediante jeringa)

¹ Correspondiente al volumen en el cual se producen fugas en la unión del módulo con la manguera de conexión.

6.1. Comportamiento individual

Sobre el comportamiento mecánico individual, se muestra el desempeño en tres pruebas experimentales que caracterizan el comportamiento de un módulo. La Figura 45 muestra la curva estática presión-volumen, donde se ve en el eje de las abscisas el aumento de volumen en porcentaje y en el eje de las ordenadas la presión aplicada en [kPa].

El punto más alto (tanto de presión como volumen) del gráfico se encuentra marcado con un asterisco para denotar que para esa presión el volumen fue determinado por la carrera de la jeringa utilizada, y no por el equilibrio estático de presiones, es decir, el volumen que aumenta el módulo a 11,8 kPa de presión es mayor al 687%, pero no pudo ser medido. Cabe destacar que el módulo no presentó fallas de ningún tipo durante la prueba, incluso al inyectar toda la carrera de la jeringa.

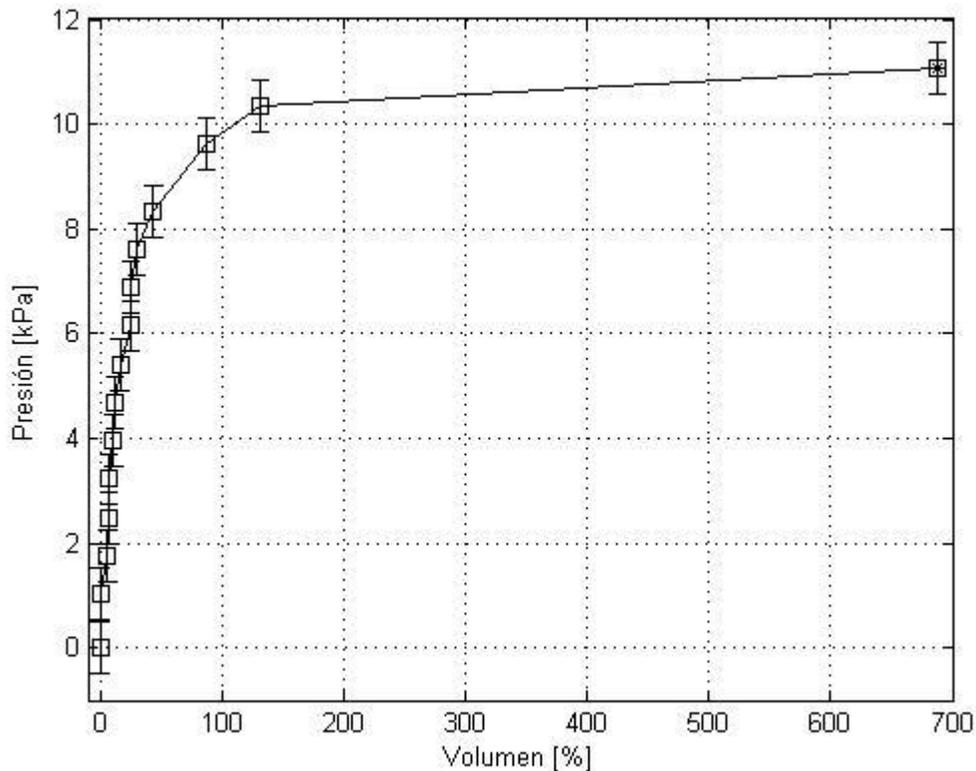


Figura 45 – Gráfico curva estática presión-volumen de un módulo

La Figura 45 indica el volumen total del módulo, pero para entender mejor la deformación se debe apoyar esta información con la Figura 46, que muestra un módulo en su estado inicial y luego expandido a 687% (63 cc). Es posible notar que el módulo cambia su forma y se parece más a una esfera con el aumento de volumen.

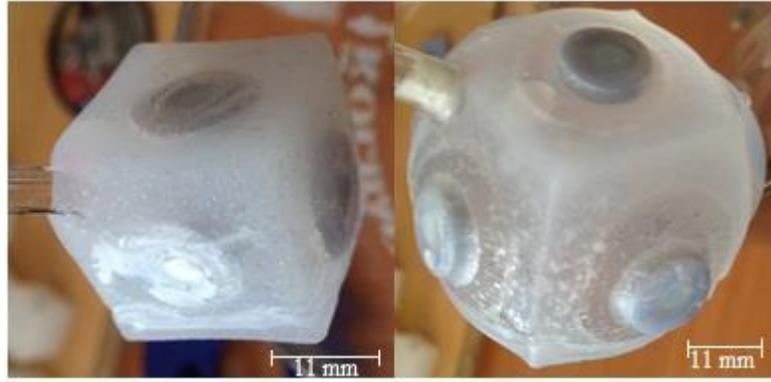


Figura 46 – Módulo de 8 cc (izq.) y módulo de 63 cc (der.)

Como el módulo resistió la expansión a 687%, se realiza la prueba de resistencia y el resultado se muestra al final de la Tabla 3 (125cc). Este resultado se obtiene al definir como falla la fuga de aire alrededor de la manguera en la parte que entra al módulo, ya que en este punto la presión es demasiada para que el sellante utilizado en la base de la manguera siga conteniendo el aire comprimido, pero cabe destacar que el módulo puede continuar su expansión sin presentar daños.

La Figura 47 muestra el comportamiento en el tiempo del módulo ante un impulso de presión, con el estanque a 20 psi (alrededor de 130 kPa). El volumen total del módulo es estimado al analizar los fotogramas del video registrado, midiendo el volumen inicial y final. Cabe destacar que el módulo no exhibe fallas ni daño de ningún tipo durante la prueba.

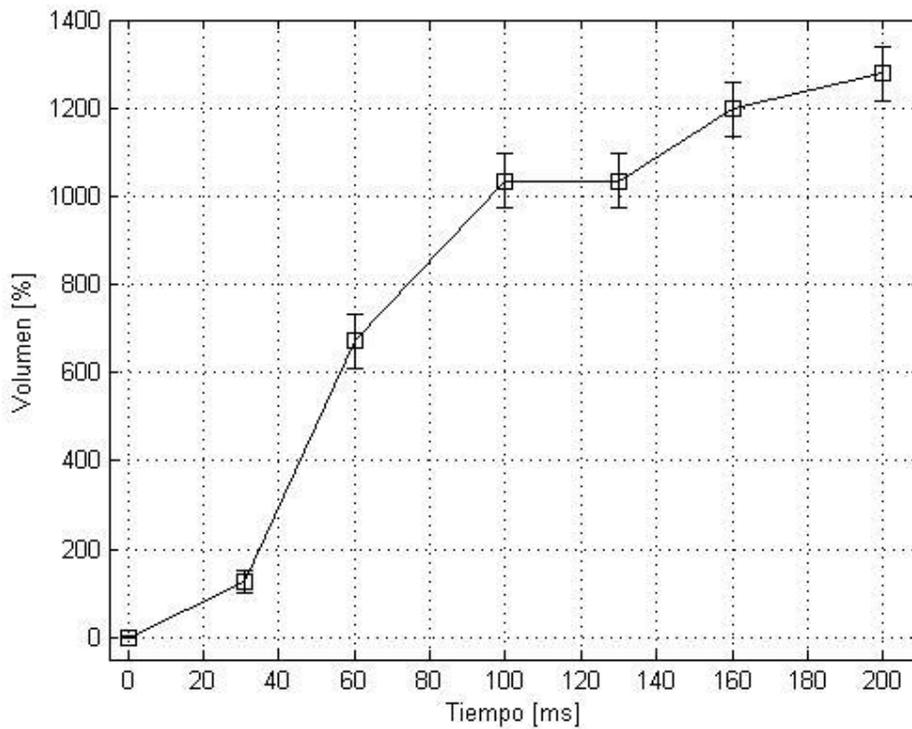


Figura 47 – Respuesta temporal de un módulo a un pulso de presión (20 psi)

6.2. Comportamiento del sistema

Con el montaje propuesto, el sistema robótico está dotado de ocho módulos que pueden actuar por separado y de forma independiente del resto, dando mayor libertad para controlar el sistema.

Para probar el comportamiento real de los sistemas simulados (sección 3.3.1) se construyen los tres sistemas en la realidad con los módulos fabricados, como muestran las Figuras 48, 49 y 50.



Figura 48 – Sistema 1 real

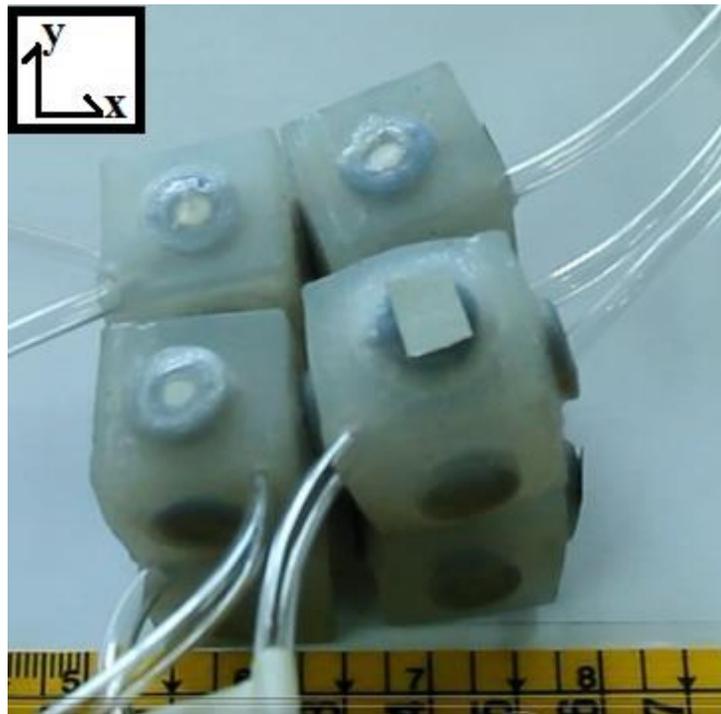


Figura 49 – Sistema 2 real

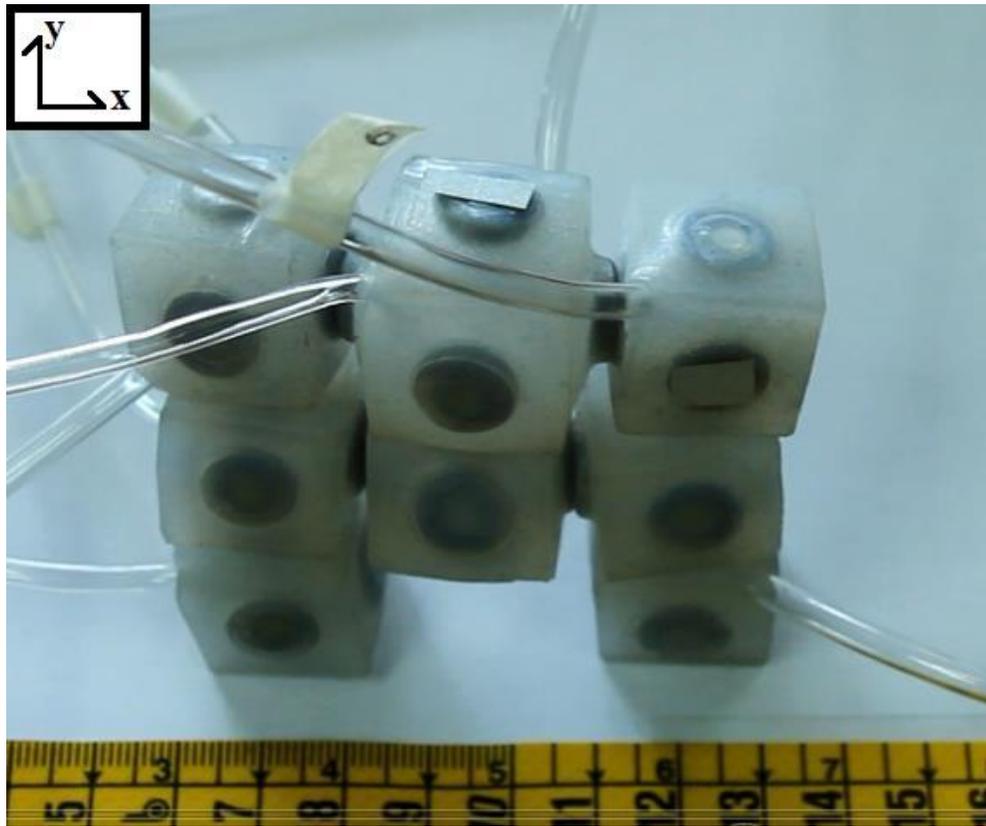


Figura 50 – Sistema 3 real

Los tres sistemas son sometidos a la secuencia de activación indicada en la sección 3.3.2, similar a un pulso que recorre el conjunto de módulos en orden. Las mediciones realizadas con OptiTrack entregan las coordenadas del centro de masa de cada sistema. Las Figuras 51, 52 y 53 muestran el desplazamiento total en el tiempo (medida como la distancia en línea recta desde el punto de partida), en el plano XY para cada sistema. Los puntos que se disparan de las curvas se atribuyen a la captura de posición de las mangueras de los módulos en algunos instantes de la medición.

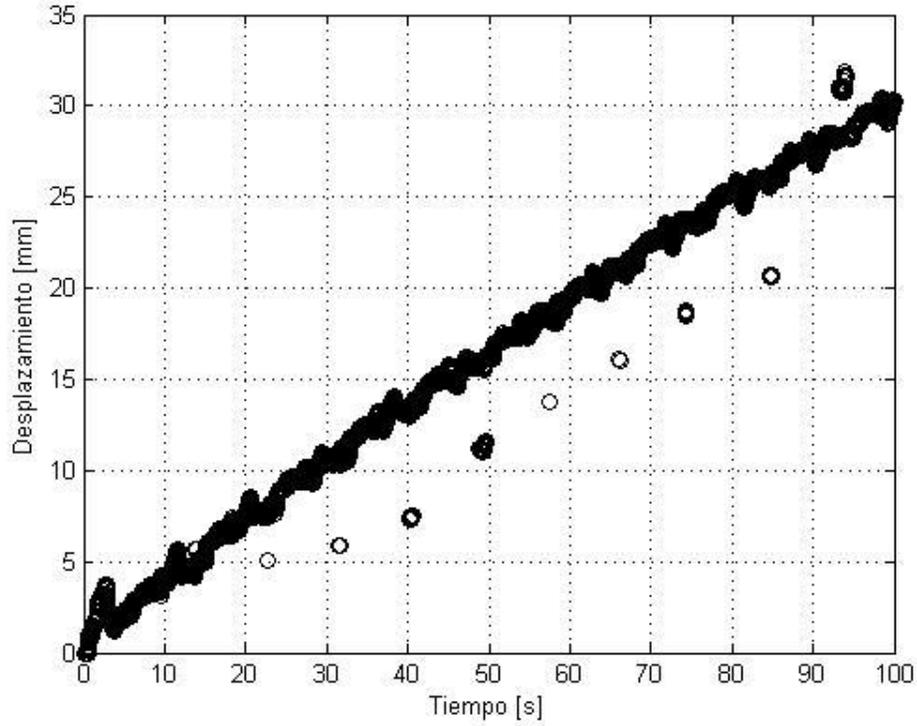


Figura 51 – Desplazamiento total centro de masa Sistema 1

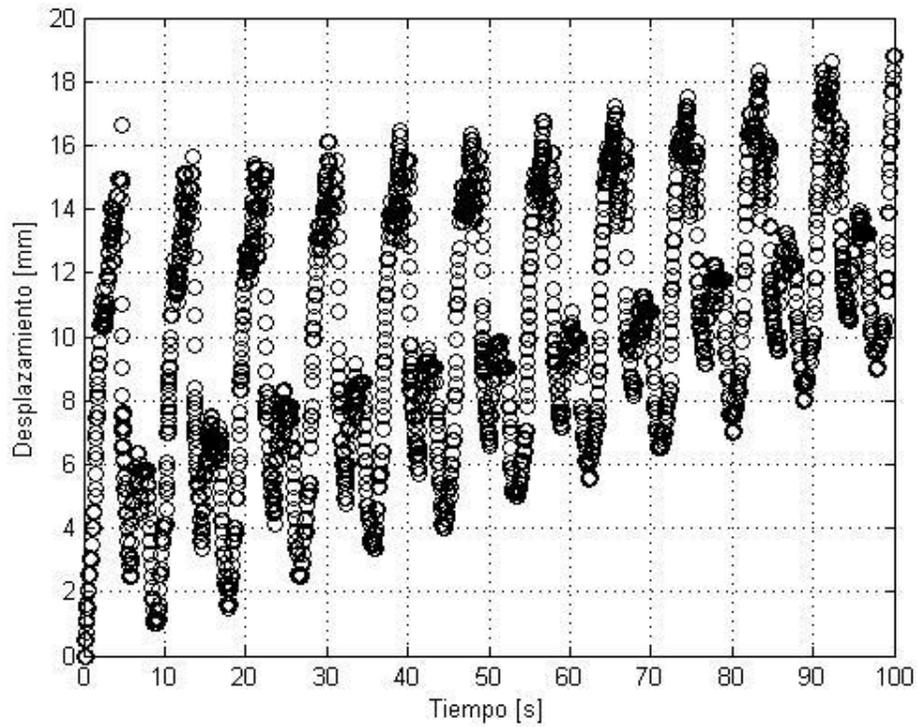


Figura 52 – Desplazamiento total centro de masa Sistema 2

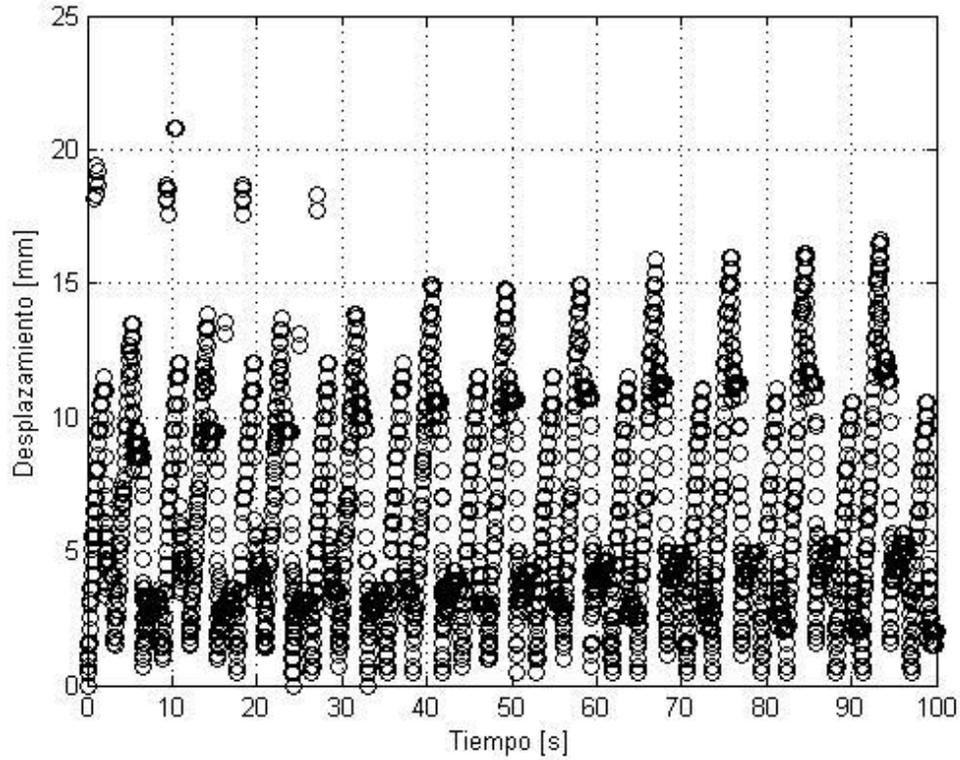


Figura 53 – Desplazamiento total centro de masa Sistema 3

Es posible notar que el Sistema 1 fue el único que se desplazó significativamente, mientras que los Sistemas 2 y 3 exhiben pequeños desplazamientos con cada ciclo respecto a la oscilación del centro de masa durante la secuencia. Todos los movimientos poseen periodicidad, ya que la secuencia es periódica. La Figura 54 compara los desplazamientos entre sistemas.

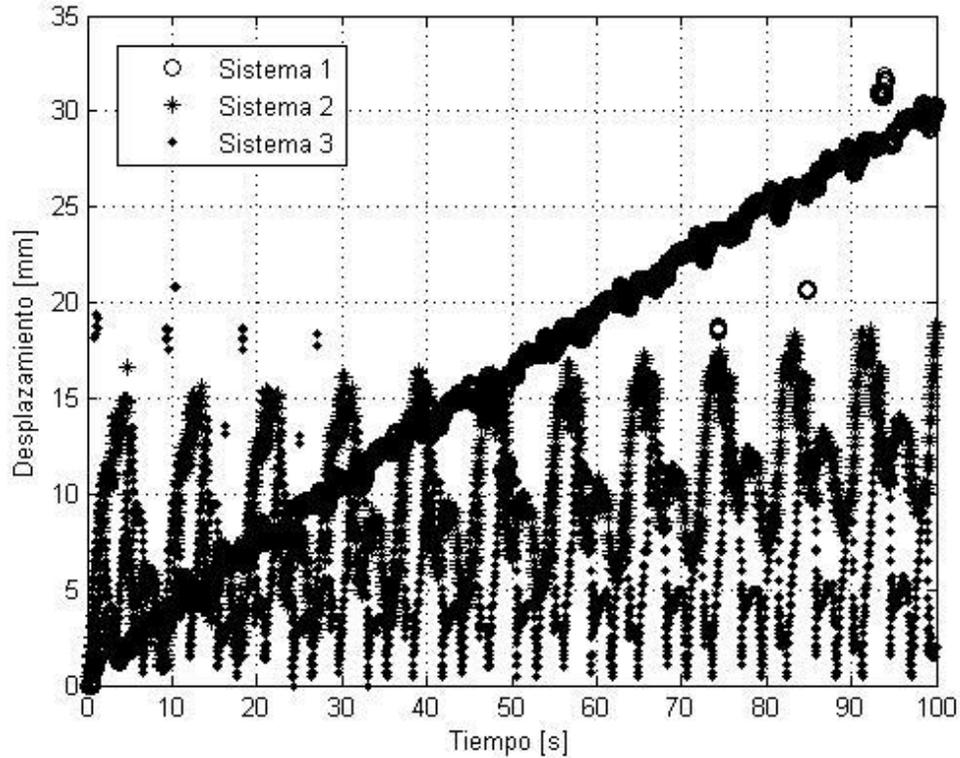


Figura 54 – Desplazamientos totales de centros de masa de Sistemas 1, 2 y 3

De la Figura 54 queda más claro que el Sistema 1 es aquel que alcanza mayor distancia en el periodo de 100 segundos, y que la oscilación del centro de masa es muy pequeña en cada ciclo respecto a los Sistemas 2 y 3. Luego el Sistema 2 alcanza mayor desplazamiento que el Sistema 3. Además de la diferencia en magnitudes entre las simulaciones y el sistema real, también existen diferencias en trayectoria, ya que ninguno de los sistemas reales se desplazó en una única dirección (o preferentemente una) como en la simulación. Los gráficos de las Figuras 55, 56 y 57 separan el desplazamiento en X y en Y para cada sistema.

En general, los desplazamientos en X tienen oscilaciones de mayor amplitud. El desplazamiento es muy marcado en la dirección X para el Sistema 1, pero existe también desplazamiento en Y (la cadena se desvía), para el Sistema 2 el desplazamiento en Y es importante (el sistema gira), y para el 3 hay desplazamiento neto en X, y una oscilación casi aleatoria en Y.

Cabe destacar que durante todo el ensayo (más de 100 segundos capturados) los sistemas no presentaron problemas de conexión o inestabilidad local.

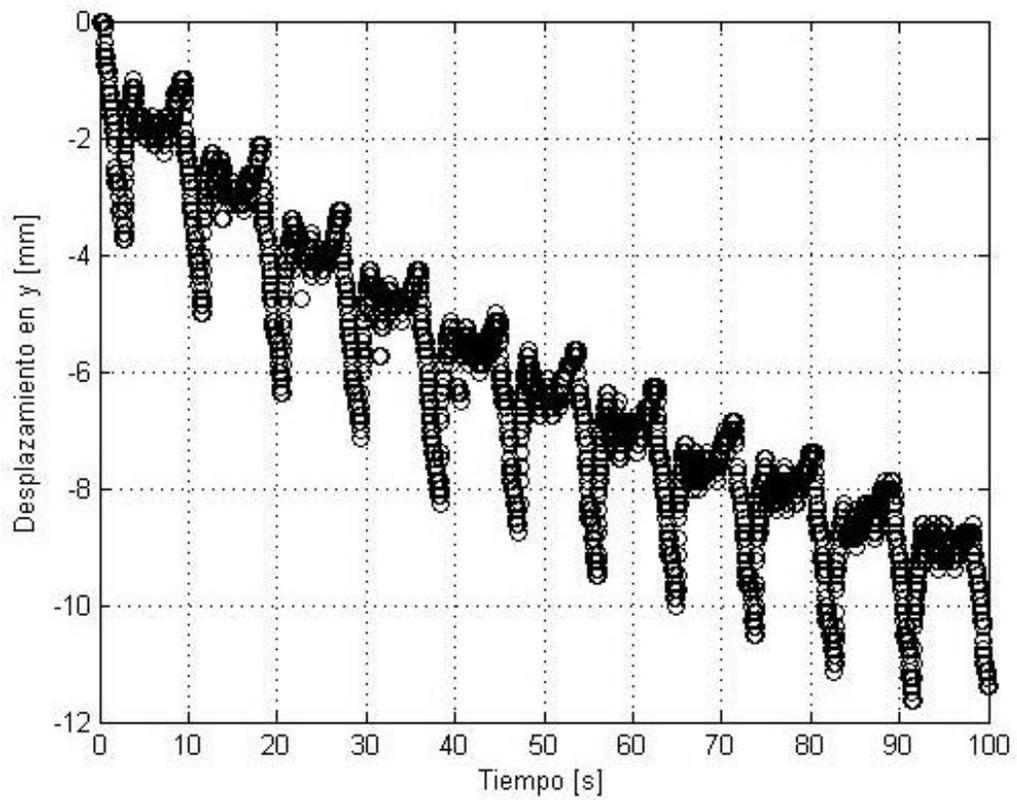
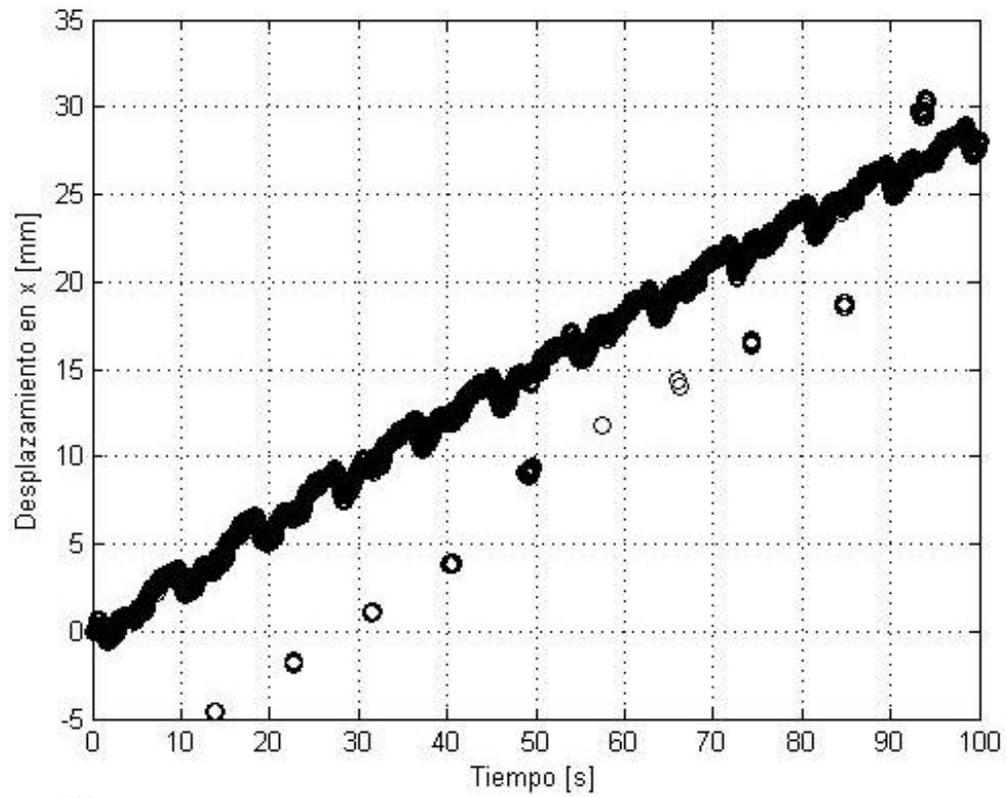


Figura 55 – Desplazamientos en X (arriba) e Y (abajo) Sistema 1

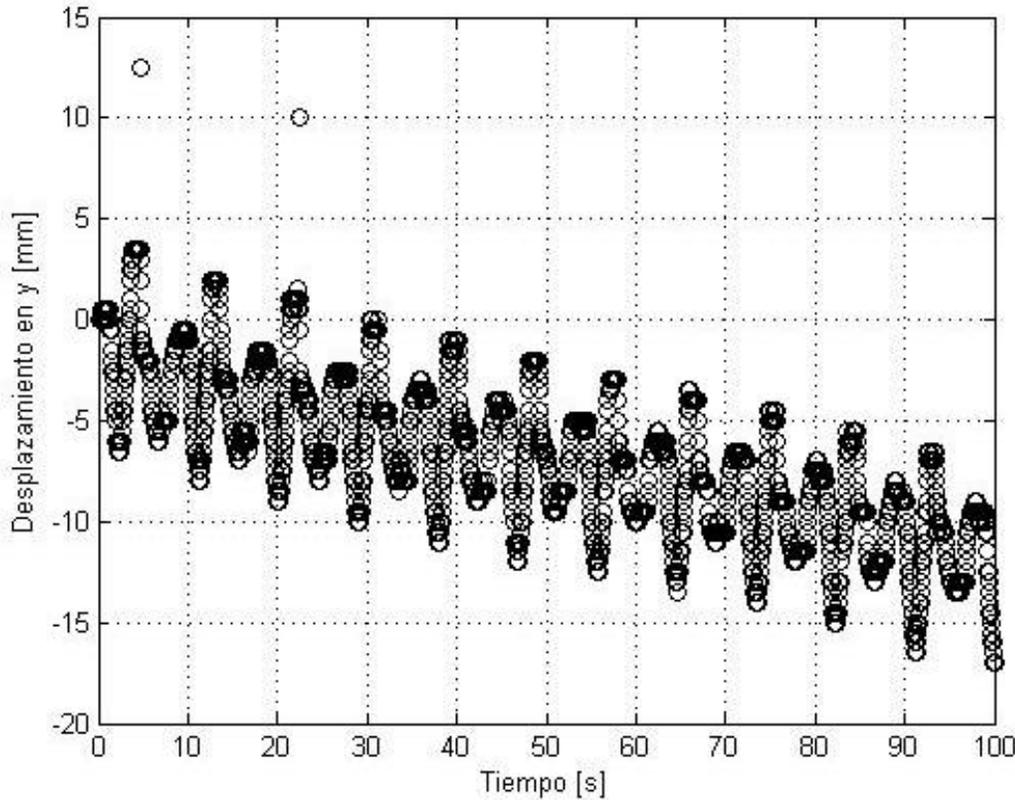
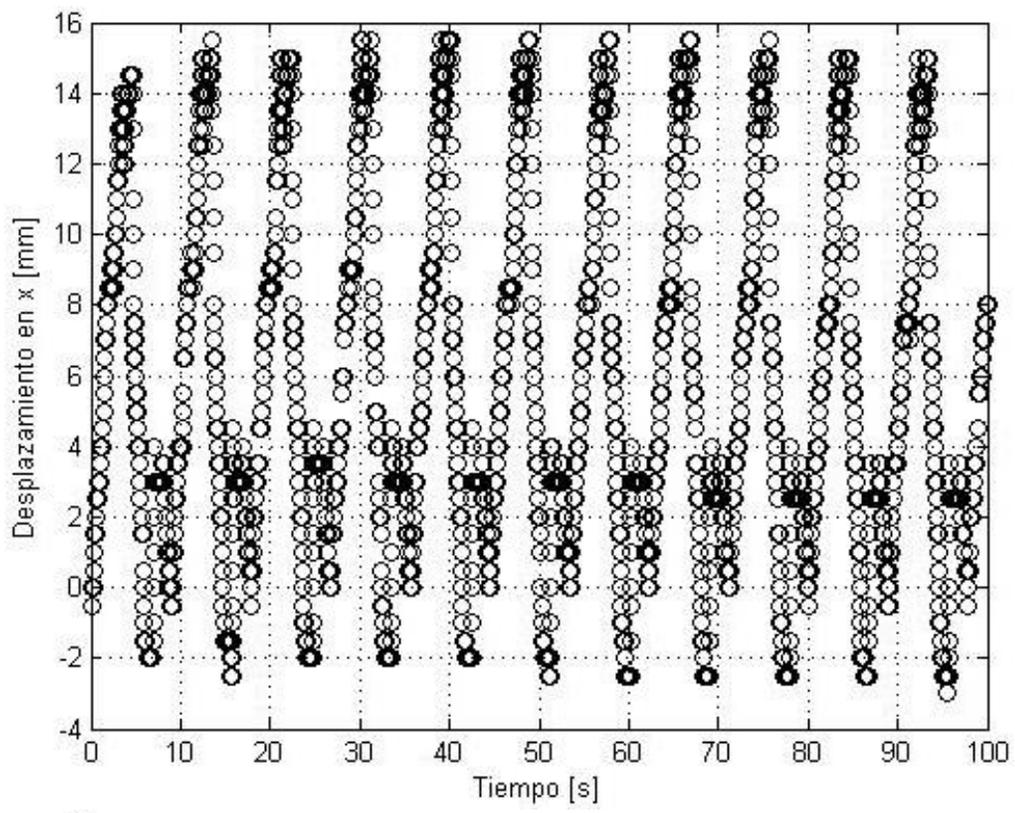


Figura 56 – Desplazamiento en X (arriba) e Y (abajo) Sistema 2

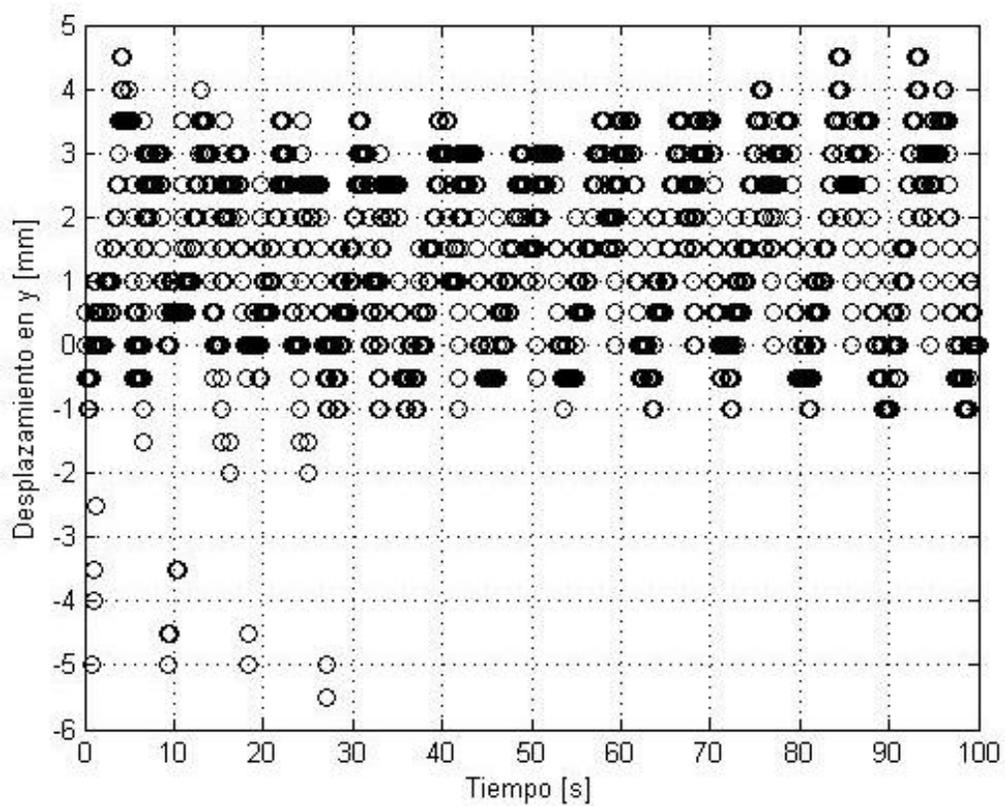
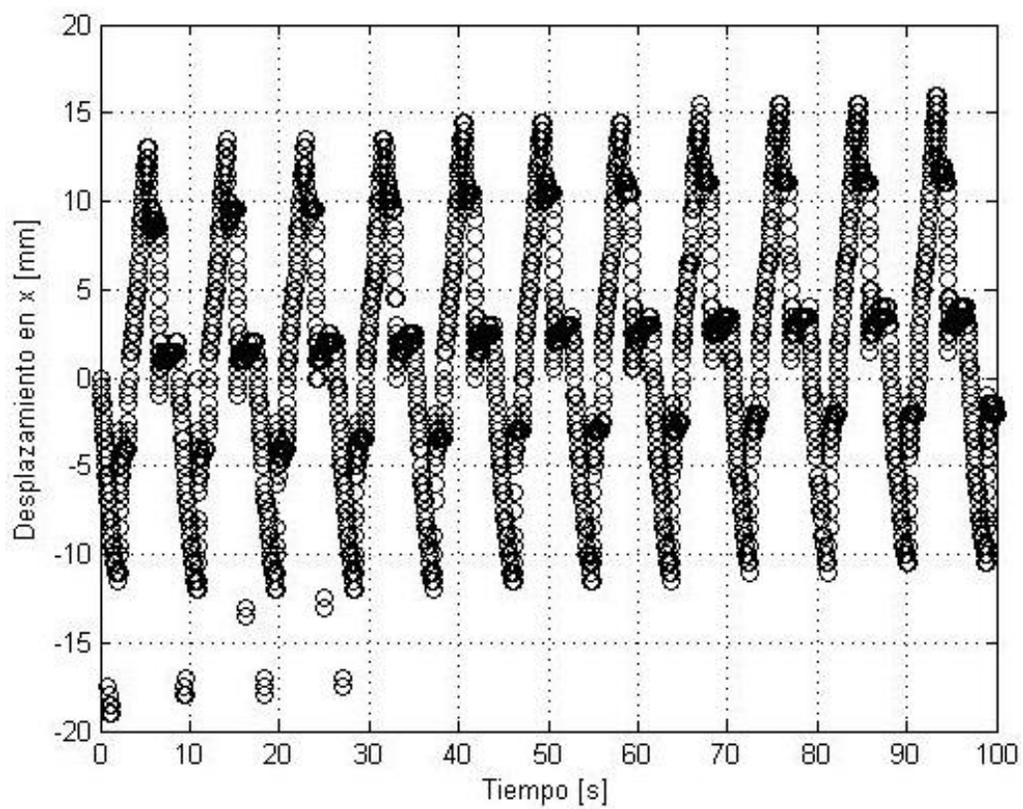


Figura 57 – Desplazamiento en X (arriba) e Y (abajo) Sistema 3

6.3. Costo unitario

Los materiales que componen cada módulo son: resina de silicona, plástico fotopolímero e imanes de neodimio (más detalles en Anexo B). Considerando la cantidad de cada material necesario para fabricar un módulo y su costo en el mercado al detalle (envase más pequeño disponible) es posible estimar el costo unitario de los robots blandos. La Tabla 4 muestra el detalle de costos.

Tabla 4. Detalle costo unitario

Ítem	Precio unitario [CLP]	Cantidad	Costo [CLP]
Cuerpo blando	\$120 ²	1	\$120
Marco Imán	\$60 ²	6	\$360
Imán	\$420	6	\$2.520
TOTAL			\$3.000

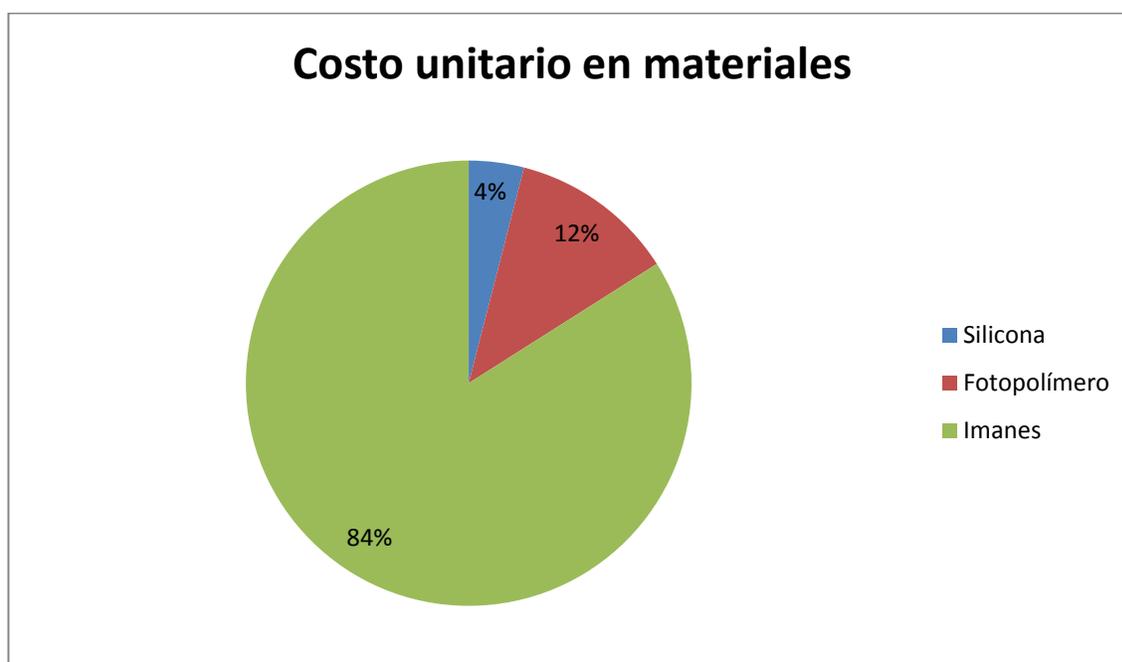


Figura 58 – Costo unitario en materiales

La Figura 36 permite notar con claridad que la mayor influencia en el precio unitario son los imanes del sistema de acoplamiento, y que el resto del módulo tiene un costo pequeño. También es importante destacar que en el precio de la silicona y el fotopolímero no se considera costos de envío y deben ser importados, ya que no se encuentran disponibles en el mercado nacional.

² Precio de venta al detalle en mercado internacional, no incluye costos de envío ni impuestos por importación.

6.4. Operación y mantenimiento

Para la operación del sistema, y con los componentes utilizados en el circuito electrónico, se requiere el consumo de 8 [W], aproximadamente. Lo anterior constituye un consumo bajo, fácil y seguro de suplir en ambientes caseros.

Debido a que el cuerpo de los módulos se encuentra hecho de resina de silicona, resiste caídas y golpes moderados, y si se modifica el material de los marcos para imán, se podría alcanzar un rango de temperatura de operación muy amplio (-50 a 230°C). Sin embargo, el accionamiento neumático exige que la cámara interna esté en buenas condiciones, sin agujeros o picaduras. Por lo anterior, se debe tener extremo cuidado de no pellizcar o cortar la superficie de la cámara interna al colocar la manguera para su operación.

Al existir defectos en la cámara interior, en particular en la membrana debajo del imán, podría expandirse un bolsillo en lugar del módulo completo, lo que constituye una deformación no deseada.

Otra falla común es la rotura de la membrana que cubre el imán, lo que no afecta mucho la deformación del módulo, pero ocasiona la caída del imán del bolsillo roto.

Estas fallas pueden ser reparadas con facilidad bajo las siguientes condiciones: el cuerpo del módulo se encuentra limpio, la membrana de la cámara interior se encuentra completa o el agujero es imperceptible a la vista en estado de cero deformación y que la membrana externa se rompe de forma que se parece a su estado en la fabricación (previo a colocar el imán), es decir, sólo falta una circunferencia de diámetro máximo 5 mm aproximadamente y relativamente centrada para completar la membrana que cubre el imán. Bajo estas condiciones es posible repetir el paso de la fabricación para la incorporación del imán (colocar una gota de resina líquida para sellarlo y esperar que seque), pero además se debe colocar una gota dentro del bolsillo antes de reponer el imán para sellar la membrana interna en el proceso.

7. DISCUSIÓN

El procedimiento de fabricación desarrollado produce módulos que corresponden al diseño logrado, con el tamaño, espesor y conexión deseada. Las simulaciones realizadas muestran el potencial que tiene esta tecnología. Sin embargo, algunas de las propiedades de los módulos y del sistema no son sencillas de calcular a priori, por lo que la realización de las pruebas experimentales y sus resultados entregan información valiosa para conocer más sobre las ventajas y desventajas de utilizar materiales blandos para robótica modular.

Las simulaciones realizadas cumplen el objetivo de explorar el potencial que tendría un sistema modular blando real. En base al comportamiento observado en el software se lleva a cabo el diseño de los módulos y sistemas.

7.1 Diseño

Cada módulo es extremadamente sencillo, porque no requiere circuitos ni mecanismos internos para el funcionamiento del sistema. Lo anterior es posible ya que se aprovecha las propiedades mecánicas de la resina de silicona como “mecanismo” de actuación, en particular su gran deformación elástica. No obstante, se destaca que sí se hace necesario contar con un sistema neumático (y su respectivo circuito de control) que alimente los módulos.

El diseño desarrollado permite la conexión entre módulos sin que se genere interferencias por los otros imanes, mantiene la superficie del imán en la superficie de la cara del módulo y además protege la cámara interna. Dado que los imanes se encuentran en el punto de mayor deformación en la expansión, se asegura la conexión entre dos módulos aún a volúmenes elevados. La simetría del módulo busca que durante la actuación la deformación sea lo más simétrico posible.

A pesar de que el diseño es aceptable, también se han identificado algunas características que pueden ser mejoradas. Es recomendable alterar levemente el diseño para engrosar un poco las paredes internas (la membrana entre el imán y la cámara interior) para hacerla más resistente a pinchazos y pellizcos interiores, que se vuelven difíciles de evitar al conectar la manguera al módulo. Lamentablemente, debido al sistema de actuación escogido, los módulos son muy vulnerables al daño de la cámara interna, ya que para funcionar no es posible tolerar ni siquiera una pequeña muesca. Otra mejora es redondear más los bordes del marco para imán, ya que en algunas ocasiones pueden romper la membrana externa que encierra el imán.

En el caso de que se diseñe una interfaz de conexión que vaya adherida al módulo, no sería necesario engrosar la pared interna, ya que se facilitaría la conexión neumática, pero se debe cuidar que esta interfaz de conexión no sea demasiado rígida ni entorpezca la actuación.

Finalmente, si fuera posible conseguir compresores muy pequeños entonces estos podrían ser incorporados al interior del módulo y permitir que éste no necesite mangueras, lo que le da más independencia. Sin embargo, este paso requiere también que la electrónica necesaria para control sea suficientemente pequeña para incorporarla en el interior también.

7.2 Fabricación

El proceso de fabricación no es complejo, pero sí resulta demoroso debido a los intervalos de espera que se deben realizar. Para lograr la forma final, es necesario fabricar por partes el cuerpo blando y debido a la naturaleza líquida de la resina antes de curar no es posible insertar todos los imanes a la vez. Dicho lo anterior, el ritmo de producción es cercano a un módulo por día si se cuenta con un set de moldes.

Un aspecto importante a considerar es que la fabricación requiere herramientas o máquinas que puedan generar moldes con una precisión de 0.1 mm al menos, ya que se requiere uniones deslizantes y se trabaja con dimensiones ajustadas (recordar que el diseño considera paredes de espesor 1 mm). La fabricación de moldes con una precisión deficiente podría resultar en módulos defectuosos, que resulten en filtración de resina hacia el exterior del molde o agujeros debido a que la resina no logra inundar todo el volumen.

Las fallas que constituyen un daño permanente a los módulos son principalmente de dos tipos: rotura de la membrana interior y rotura total de la membrana exterior. Presumiblemente estas fallas son causadas por defectos en la fabricación, ya que algunos ejemplares son capaces de expandirse más de 10 veces sin sufrir estas roturas, mientras que otros las sufren a volúmenes menores. Por este motivo se estima que puede ser conveniente agregar al proceso de fabricación la degasificación de la resina antes de colocarla en los moldes o sobre los imanes, eliminando todas las burbujas posibles, que tienden a ser el origen de un agujero.

El método de fabricación propuesto es práctico para fase de investigación y generación de prototipos, ya que el proceso no requiere herramientas especiales. Pero en el caso de producción masiva este método se vuelve altamente ineficiente y es necesario buscar alternativas. Posiblemente sea buena opción usar una matriz e inyectar la resina, a pesar de que la matriz sea compleja. Si se logra producir el módulo en una sola etapa (con los imanes insertados y en una sola pieza), el tiempo de ciclo disminuye drásticamente a un periodo de curado, que es de cuatro horas de acuerdo al fabricante.

7.3 Desempeño

El desempeño individual de los módulos es importante porque determina las limitaciones del sistema. De acuerdo a las pruebas realizadas, es posible expandir cada módulo del sistema mucho más que sólo el doble de su volumen inicial, lo que amplía las capacidades del sistema robótico.

La primera prueba de conexión entre módulos entrega resultados satisfactorios, en el sentido que se cumple las exigencias establecidas en los objetivos. Este resultado es posible debido a la fuerza de los imanes y al reducido peso de los módulos. Aun así, los módulos son muy sensibles al torque, ya que los imanes soportan mucha fuerza en la dirección transversal, pero no tienen la misma resistencia ante fuerzas de corte.

De los resultados obtenidos de las pruebas de comportamiento individual es posible decir que los módulos exhiben grandes deformaciones a presiones bajas, lo que se considera una ventaja al no requerirse compresores de alta capacidad, ni gasto energético excesivo, además de resultar mucho más seguro operar un sistema a baja presión. Sobre la forma de la curva de deformación, se observa la esperada influencia del comportamiento típico de los elastómeros, donde el tramo de deformación elástica es no lineal, y la resistencia es alta al principio hasta un punto donde pequeñas variaciones en presión generan una gran variación de volumen.

A pesar de que la resistencia máxima del módulo no pudo ser determinada, si es posible decir que la falla del sistema probablemente ocurra por desconexión del módulo a la línea de presión antes de estallar. Lo anterior significa que los módulos poseen una especie de válvula de alivio, ya que la desconexión evita la destrucción de los módulos. Este resultado es mejor al esperado, ya que la prueba fue diseñada para generar el estallido del módulo y éste resultó ser más resistente de lo considerado.

Respecto a la velocidad del módulo, de acuerdo a la prueba de respuesta al impulso la expansión final se alcanza en un periodo de 0.2 segundos, lo que a simple vista es casi instantáneo y permitiría la operación de un sistema con movimientos bruscos. La curva que sigue es similar a la de un sistema de segundo orden, pero se esperaba ver un overshoot en la curva debido a la presión dinámica del aire inyectado. La curva que se observa es estrictamente creciente, aunque sí es posible apreciar un breve retraso en la expansión, luego de que el volumen aumente bruscamente y antes de que vuelva a aumentar despacio hasta su estabilización. Lo anterior puede ser explicado por el comportamiento elastomérico de la resina, ya que la presión inicial (compuesta por la estática más la dinámica) vence la resistencia inicial del material y al entrar en reposo el aire al interior del módulo la presión disminuye al desaparecer la presión dinámica, pero la deformación continúa porque la resistencia del material es menor luego del golpe de presión.

Respecto al comportamiento de los módulos como sistema, queda demostrado que la expansión individual no deteriora la conexión entre módulos si se encuentran apoyados. Además, un módulo tiene la fuerza suficiente para desplazar los módulos adyacentes durante su expansión, por lo menos para la cantidad de cubos probados en el sistema. Para bajos volúmenes de expansión

(200% - 300%), la evacuación del aire al abrir la válvula es relativamente rápida, tomando alrededor de un 10% del tiempo requerido para expandir el módulo con los compresores utilizados. No obstante, un compresor más potente puede disminuir el tiempo de expansión requerido, permitiendo realizar movimientos en menor tiempo.

La prueba de sistema demostró que los módulos son capaces de actuar en conjunto sin desconectarse, al menos para el tamaño de sistema utilizado. Los resultados de desplazamiento para los sistemas son muy distintos en magnitud, ya que las simulaciones sugerían desplazamientos del orden de 200 mm en 100 segundos (para Sistemas 2 y 3) e incluso 1000 mm (Sistema 1), en cambio, las mediciones a sistemas reales indican desplazamientos como máximo 30 mm en el mismo periodo de tiempo. Estas diferencias eran esperadas, ya que se subestimó el coeficiente de roce en la simulación y además existen muchas diferencias en el sistema real: los módulos no se expanden manteniendo su forma cúbica (tienden a convertirse en esfera), la conexión entre módulos ocurre en un área reducida en el centro de las caras (no en toda la superficie), la secuencia de activación real no es exactamente igual a la simulada, entre otras diferencias menores.

No obstante las diferencias, al comparar los gráficos de las Figuras 26 y 54 (que muestra los desplazamientos de todos los sistemas) es posible notar similitudes: el desplazamiento del Sistema 1 es un línea “recta” y es el que más se desplaza, los Sistemas 2 y 3 tienen un desplazamiento parecido cuando se comparan al Sistema 1. Además, el Sistema 2 real también tiende a girar como en la simulación. De esta forma, es posible decir que la simulación en VoxCad constituye una herramienta útil para complementar el diseño de sistemas robóticos modulares blandos.

Durante la prueba de sistema algunos módulos presentaron fallas que podrían haber sido inducidas por una conexión descuidada de la manguera, aunque también se sospecha levemente que la resina podría ser vulnerable a fatiga cuando existen defectos muy grandes como burbujas. Sin embargo, entre las pruebas realizadas no se consideró un ensayo de este tipo, y además sería difícil medirlo porque solo algunos módulos fallaron después de varias actuaciones y otros que operaron más veces siguen intactos.

A pesar de que las pruebas entregan resultados satisfactorios, se reconoce que la escalabilidad obtenida es insuficiente para construir estructuras complejas y ejercer grandes fuerzas por parte del sistema, para lo cual sería necesario volver a evaluar el sistema de acoplamiento. Esto requiere un rediseño sustancial, ya que se debe cuidar que el acoplamiento no entorpezca la expansión y sea compatible con la estructura blanda.

8. CONCLUSIÓN

Como fue expuesto en los antecedentes del trabajo, la investigación en el área de robótica trata de encontrar nuevas vías de producción y distintas formas de funcionamiento que permitan generar robots más versátiles, accesibles y seguros para el contacto humano. Con el afán de aportar en esta dirección, este trabajo exploró por primera vez la mezcla de la robótica modular con la reciente robótica blanda, utilizando materiales blandos y aprovechando sus características para la construcción de un sistema robótico modular.

Las simulaciones realizadas dan una idea preliminar de las características de un sistema robótico modular blando, y sientan las bases para acotar el diseño: la forma, la actuación, el acoplamiento. Sin embargo el software no es capaz de simular con precisión porque la deformación real es distinta.

Los módulos fabricados son de un diseño original que cumple los objetivos establecidos, que logran una estructura sencilla y funcional. El sistema es operable con facilidad a bajas presiones (alrededor de 1 psi), y los módulos son bastante resistentes, siendo la causa principal de falla la desconexión de las mangueras.

El sistema es capaz de actuar en conjunto, sin que los módulos se desconecten unos de otros, y soportan deformaciones mayores a las requeridas por diseño. Los sistemas simulados resultan desplazarse en la realidad, aunque a velocidades muy bajas respecto a lo sugerido por la simulación. Sin embargo, los desplazamientos son similares y se reconoce que la simulación en VoxCad es útil para complementar el diseño de sistemas robóticos modulares blandos.

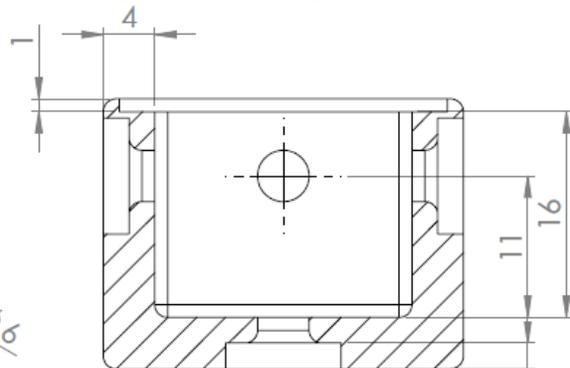
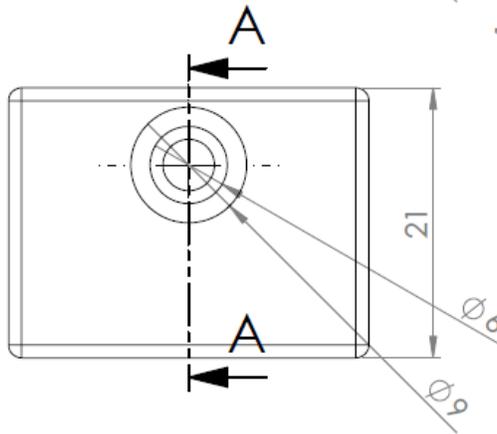
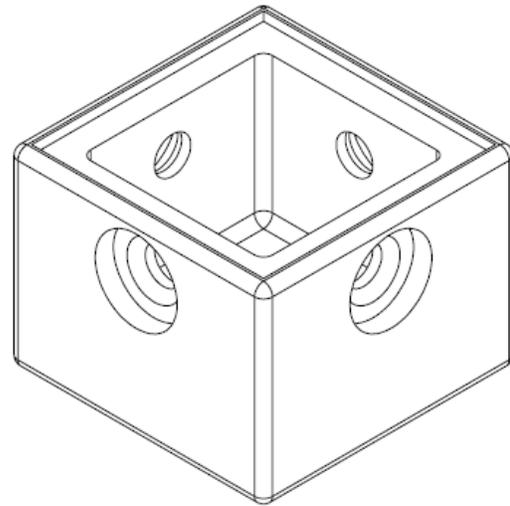
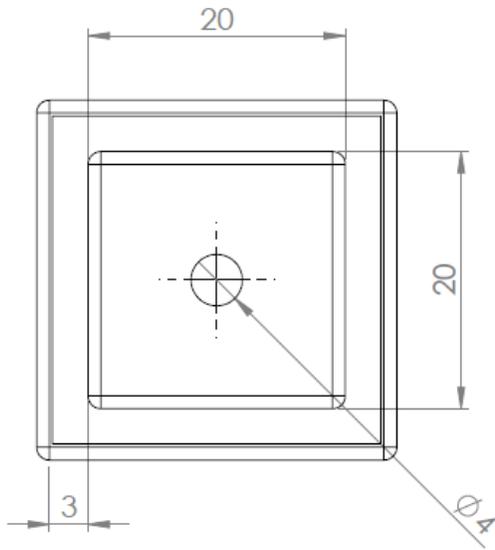
Las pruebas experimentales realizadas permiten caracterizar el comportamiento de los módulos, aunque no se puede decir con seguridad cuál es la resistencia a la fatiga del sistema, ya que esa prueba no fue realizada. Como el rango de expansión de operación es tan pequeño respecto a la expansión máxima, se estima que si bien un ensayo de fatiga puede ser interesante, no es estrictamente necesario.

Finalmente, si bien se cumplen los objetivos planteados, se identifican algunas mejoras que es posible realizar. Una de ellas es el refuerzo de la cámara interior, especialmente en las membranas de 1 mm de espesor, que se rompen con facilidad si se presionan contra cantos relativamente rígidos (como el extremo de una manguera, por ejemplo), aunque esta mejor puede ser reemplazada si se desarrolla una interfaz de conexión. Otra mejora que apunta al mismo asunto es el de redondear mejor el marco de los imanes, para evitar que los bordes puedan romper las membranas. Respecto a la fabricación, se estima que degasificar la resina puede fortalecer considerablemente los módulos, evitando la mayoría de las fallas, aunque esto signifique alargar el proceso. Es deseable también mejorar el sistema de acoplamiento para permitir la construcción de estructuras más complejas, para lo cual se requeriría una etapa de diseño más extensa.

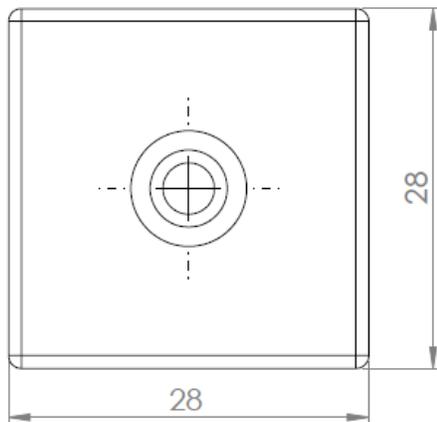
Bibliografía

1. P. Moubarak, P. Ben-Tzvi, “Modular and reconfigurable mobile robotics”, *Robotics and Autonomous Systems* 60 (2012) 1648- 1663.
2. R. Ritz, R. D’Andrea, “Carrying a Flexible Oayload With Multiple Flying Vehicles”, *Intelligent Robots and Systems* (3-7 Nov. 2013) 3465-3471.
3. M. Rubenstein, N. Hoff, R. Nagpal, “Kilobot: A Low Cost Scalable Robot System for Collective Behaviors”, *Robotics and Automation* (14-18 Mayo 2012) 3293-3298.
4. S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita, S. Kokaji, “M-TRAN: self-reconfigurable modular robotic system”, *IEEE Robotics & Automation Magazine* 14 (4) (2008) pp. 431-441.
5. A. Lyeder, R.F.M. Garcia, K. Stoy, “Mechanical design of Odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot”, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS ’08*, 2008 pp. 883-888.
6. M. Yim, Y. Zhang, K. Roufas, D. Duff, C. Eldershaw, “Connecting and disconnecting for chain self-reconfiguration with PolyBot, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 7 (4)(2002) 442-451.
7. B. Salemi, M. Moll, W.-M. Shen, “SUPERBOT: a deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system”, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS ’06*, 2006, pp. 3636-3641.
8. A. Sproewitz, M. Asadpour, Y. Bourquin, A.J. Ijspeert, “An active connection mechanism for modular self-reconfigurable robotic systems based on physical latching”, *Robotics and Automation* (Mayo 2008) 3508-3513.
9. R.F. Mendoza, J.D. Hiller, K. Stoy, H. Lipson, “A Vacuum-Based Bonding Mechanism for Modular Robotics”, *IEEE Transaction in Robotics* 27 (2011) 876-890.
10. S. Kim, C. Laschi, B. Trimmer, “Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics”, *Trends in Biotechnology* 31 No. 5 (2013) 287-294.
11. G. Kovacs, P Lochmatter, M. Wissler, “An arm wrestling robot driven by dielectric elastomer actuators”, *Smart Materials and Structures* 16 (2007) S306-S317.
12. M. Follador et al, “A general method for the design and fabrication of shape memory alloy active spring actuators”, *Smart Mater. Struct.* 21 (2012), 115029.
13. R.F. Shepherd et al, “Multigait soft robot”, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 108 (2011), 20400-20403.
14. A.N. Gent, *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*, Editorial Hanser, 2001. Capítulo 1 pp. 1-27.

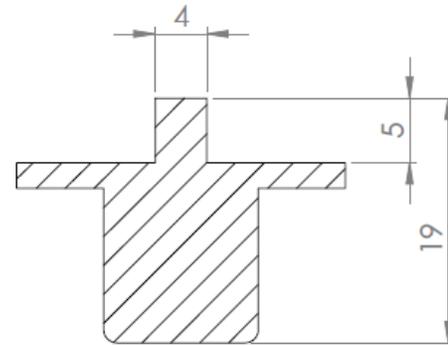
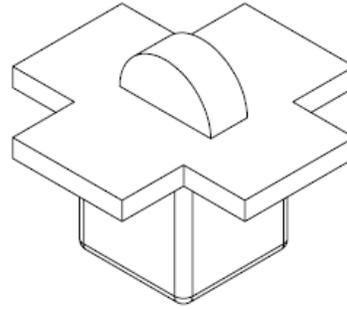
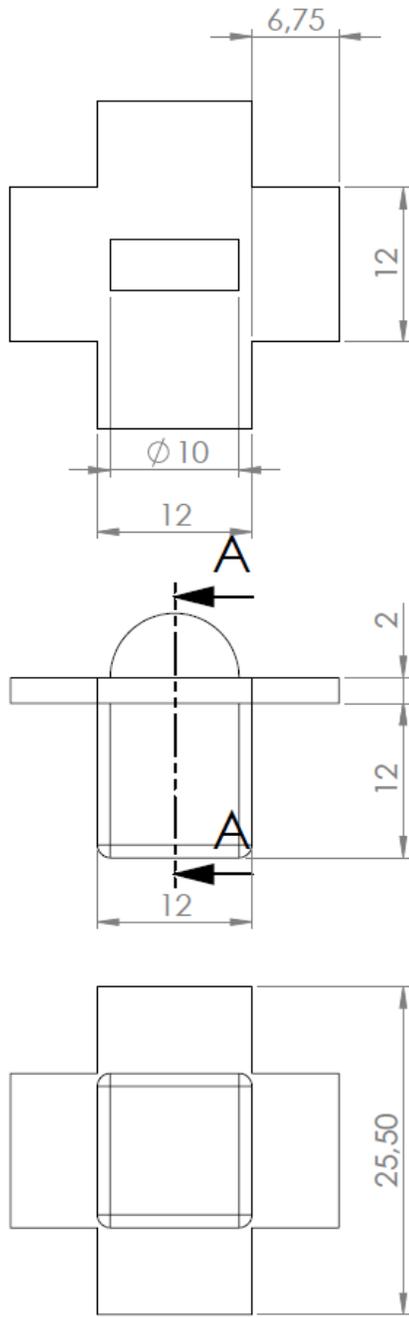
ANEXO A



SECCIÓN A-A

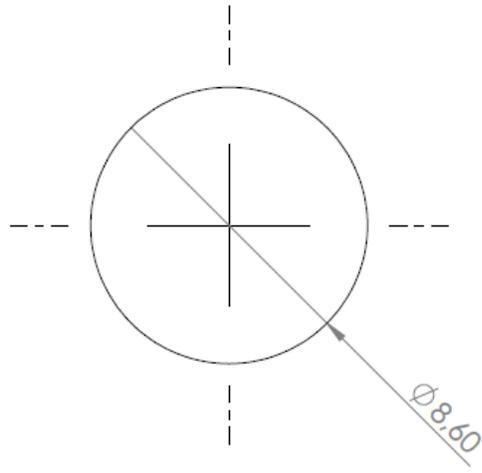
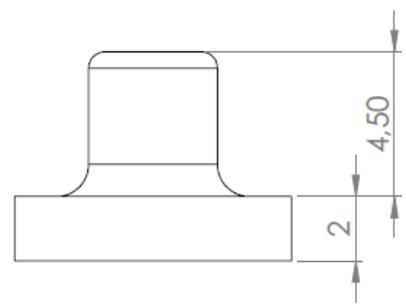
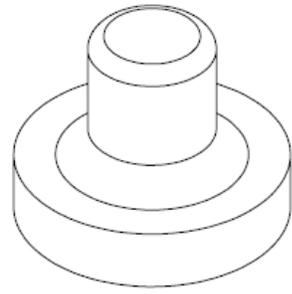
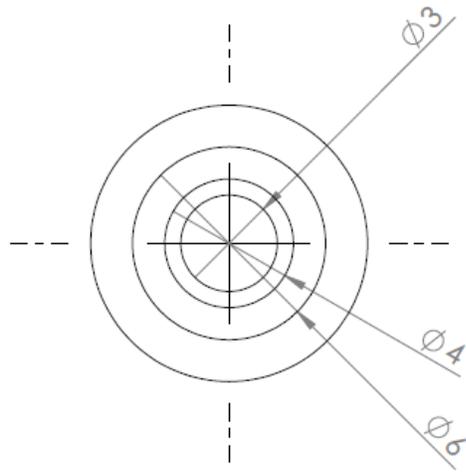


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA																		TÍTULO:		
NOMBRE	FIRMA	FECHA																								
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO		A4																				
PESO:				ESCALA: 2:1																						
						HOJA 1 DE 1																				
<h1>Molde A</h1>																										



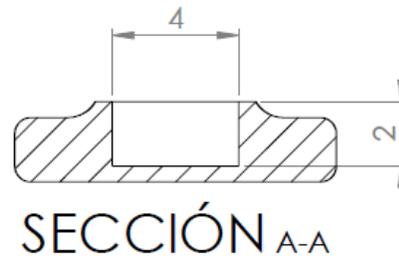
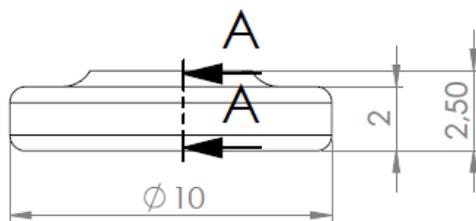
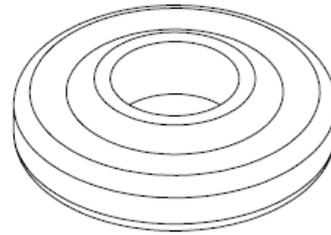
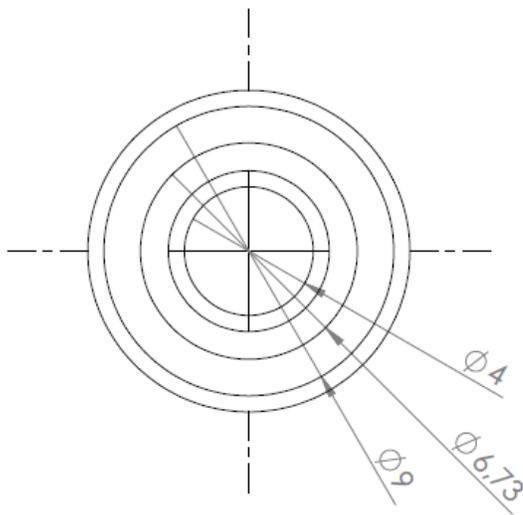
SECCIÓN A-A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE			FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.						
VERIF.						
APROB.						
FABR.						
CALID.				MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	Molde B
						A4
				PESO:	ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1

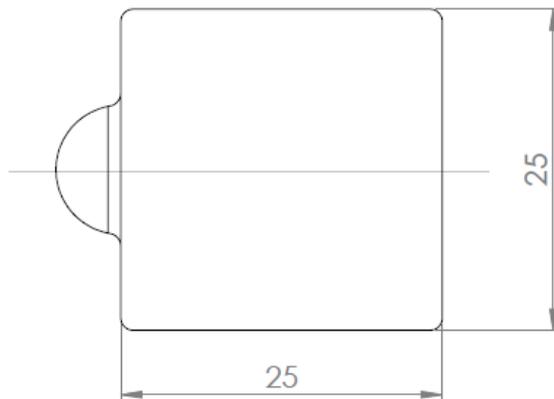
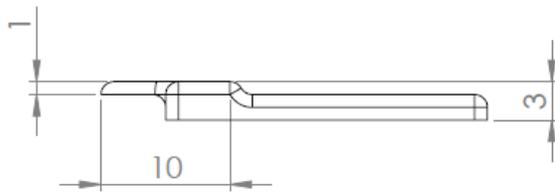
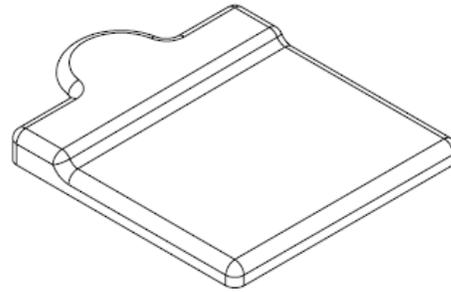
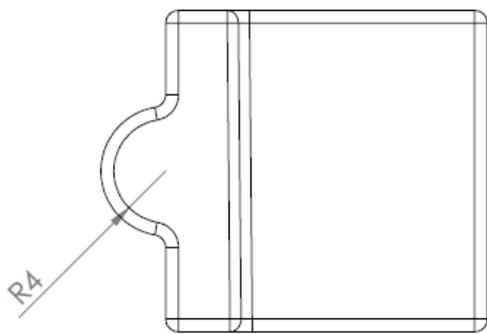


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
					TÍTULO:	
					N.º DE DIBUJO	
					Molde C	
					A4	
PESO:					ESCALA: 5:1	
					HOJA 1 DE 1	

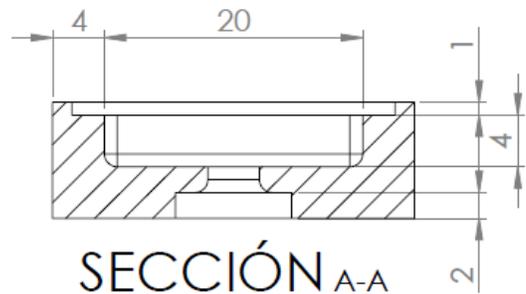
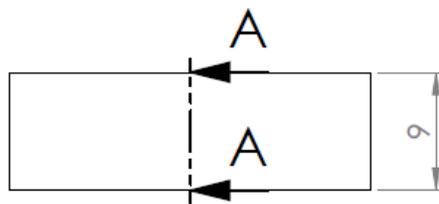
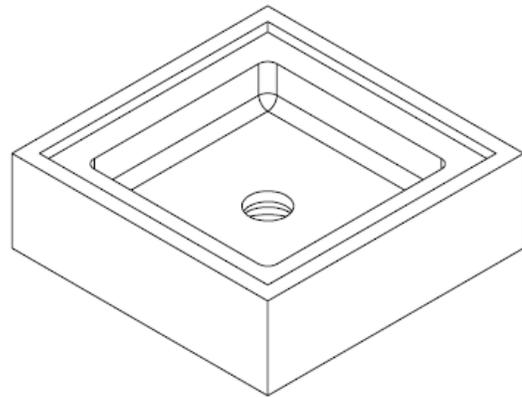
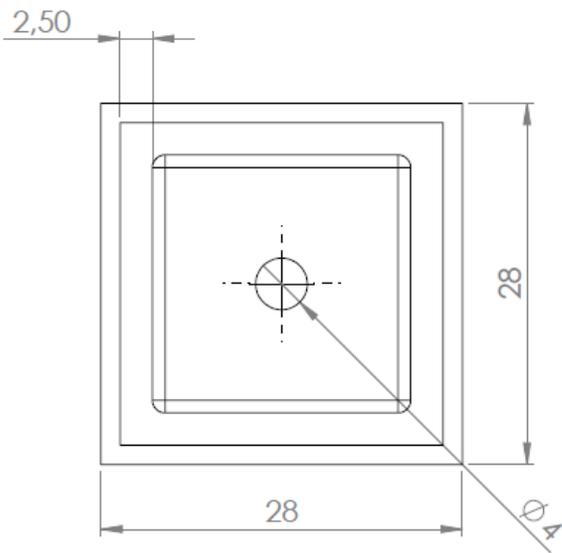
	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
								TÍTULO:			
DIBUJ.				NOMBRE		FIRMA		FECHA			
VERIF.											
APROB.											
FABR.											
CALID.						MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4	
								Molde D			
						PESO:		ESCALA: 5:1		HOJA 1 DE 1	

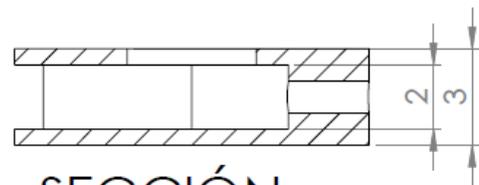
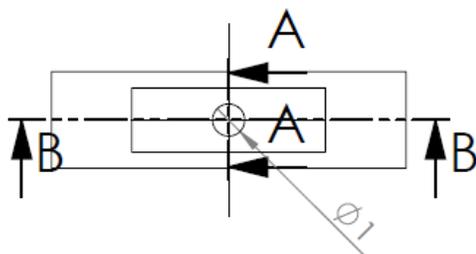
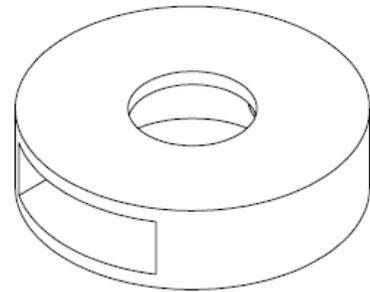
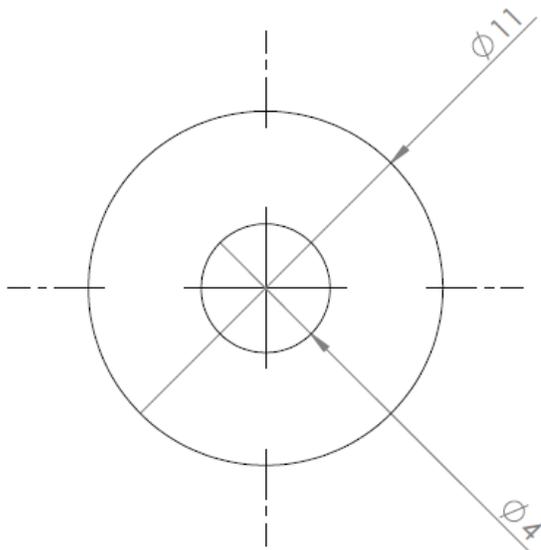


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
	NOMBRE	FIRMA	FECHA			TÍTULO:	
DIBUJ.							
VERIF.							
APROB.							
FABR.							
CAUD.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	
						Molde E	A4
				PESO:		ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1



SECCIÓN A-A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE					TÍTULO:	
FIRMA					N.º DE DIBUJO	
FECHA					Molde F	
MATERIAL:					A4	
PESO:					ESCALA: 2:1	
					HOJA 1 DE 1	



SECCIÓN A-A



SECCIÓN B-B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
					TÍTULO:	
NOMBRE			FIRMA	FECHA		
DIBUJ.						
VERIF.						
APROB.						
FABR.						
CALID.			MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	
					Marco Imán	
			PESO:		ESCALA: 1:1	
					HOJA 1 DE 1	
					A4	

ANEXO B

INFORMACIÓN TÉCNICA DE COMPONENTES

B.1 IMANES

Clasificación	Imán de Neodimio
Forma	Cilíndrica
Dimensiones (diámetro x alto) [mm]	6 x 2
Intensidad [Gauss]	3000
Fuerza de atracción [kgf]	0.1
Masa [gr]	0.42
Proveedor	SOCOTER Magnéticos
Norma	MMPA

B.2 RESINA DE SILICONA

Marca/Fabricante	Smooth-On
Modelo producto	Ecoflex 00-30
Viscosidad [cps]	3000
Gravedad específica [g/cc]	1.07
Volumen específico [in ³ /lb]	26.0
Tiempo de curado [hr]	4
Dureza Shore	00-30
Resistencia a la tracción [psi]	200
Módulo 100% [psi]	10
Elongación máxima [%]	900
Encogimiento [in/in]	<0.001
Rango de temperatura útil [°C]	-53 a 232
Resistencia dieléctrica [volts/mil]	>350

B.3 PLÁSTICO FOTOPOLÍMERO

Marca/Fabricante	Stratasys
Modelo producto	Objet RGD240
Composición [%]:	
Monómero Acrílico	<30
Acrilato de Isobronilo	<25
Oligómero de acrilato	<15
Fotoiniciador	<2
Dióxido de Titanio	<0.5
Éster de ácido acrílico	<0.3
Propilenglicol acetato de monometiléter	<0.05
Ácido fosfórico	<0.0018

ANEXO C

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO CIRCUITO CONTROL (PARTE 1)

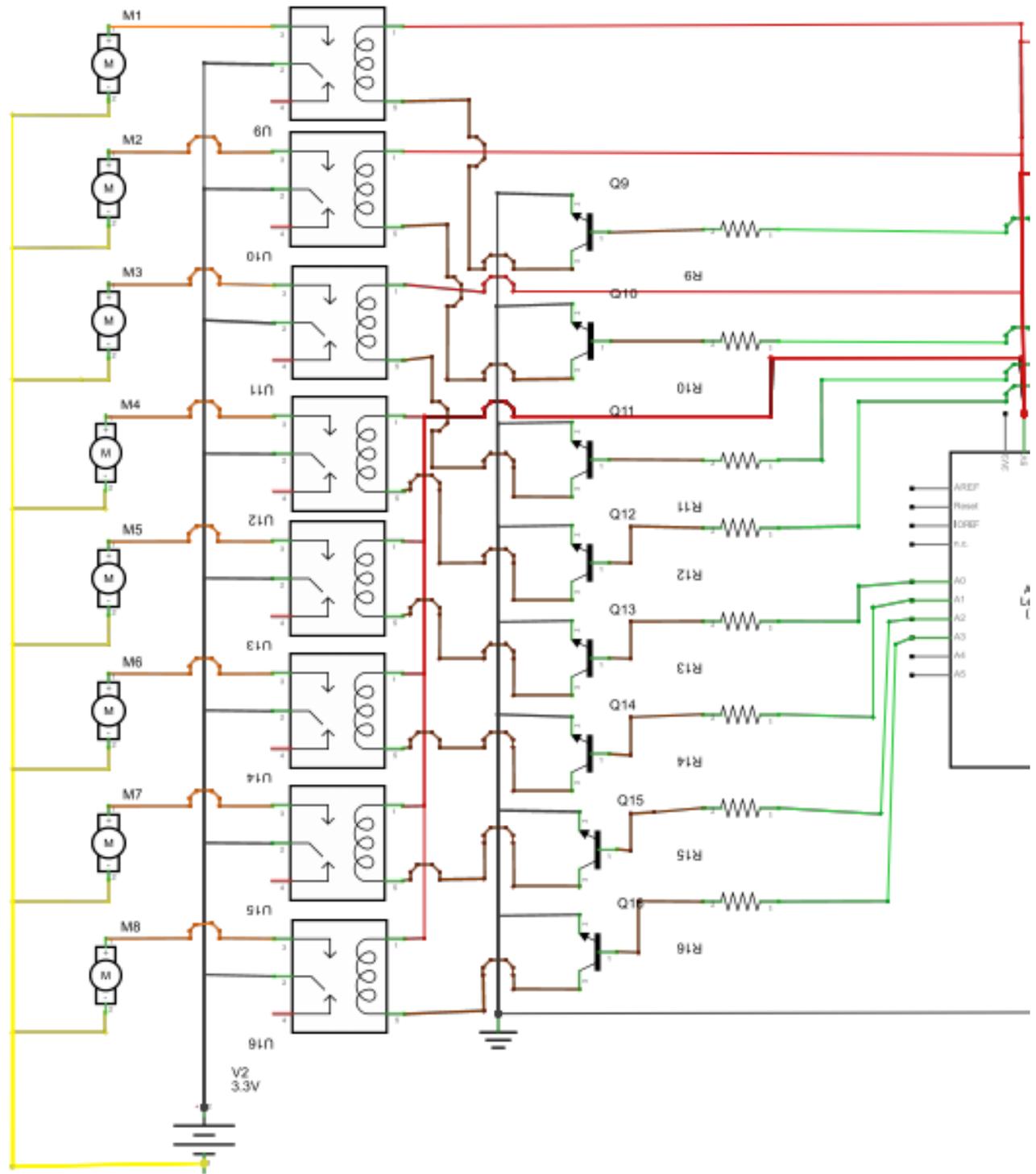
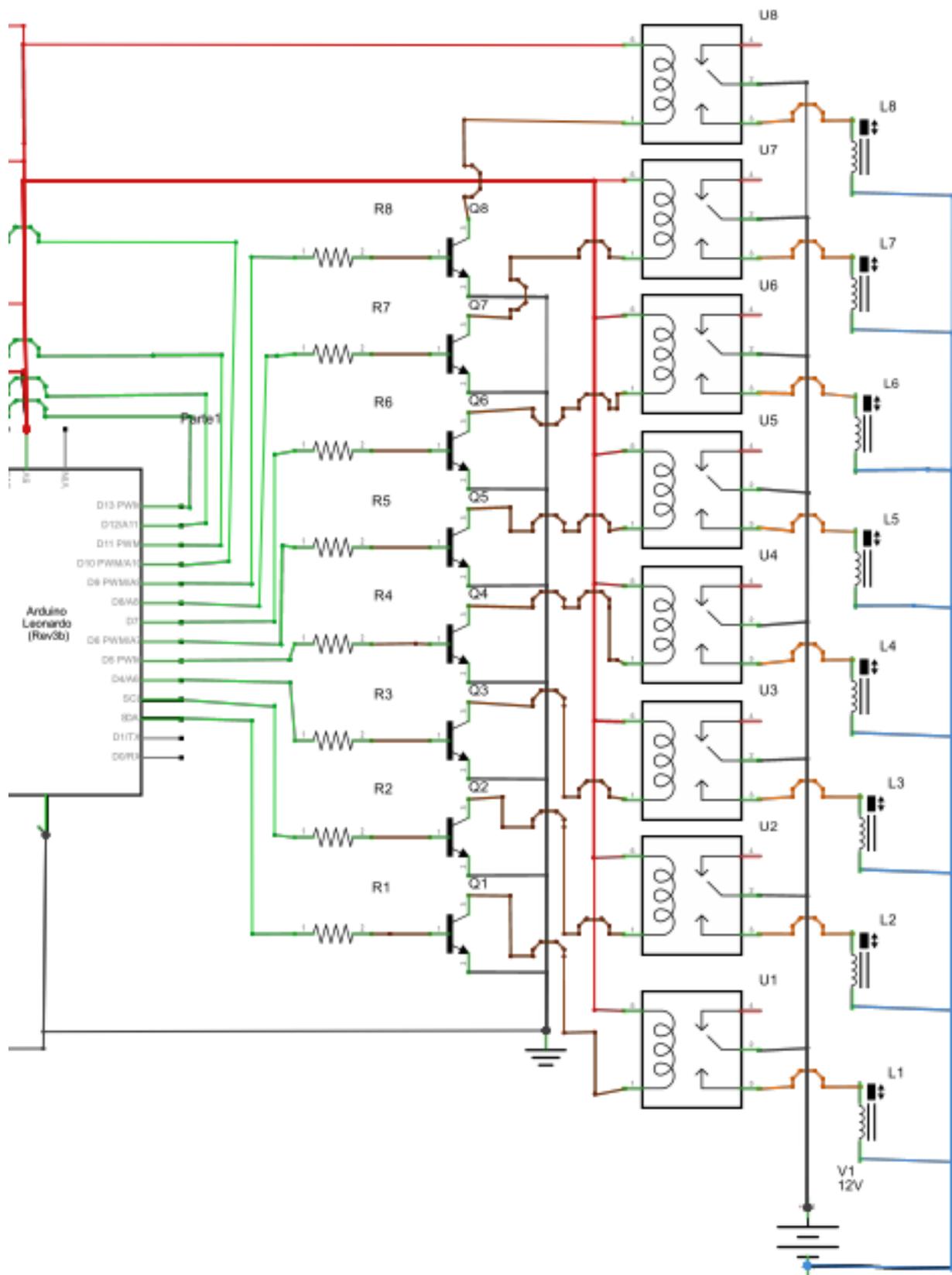


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO CIRCUITO CONTROL (PARTE 2)



LISTADO DE COMPONENTES

Etiqueta	Tipo	Propiedades
M1 a M8	Microcompresor	3V DC
U1 a U16	Relay	SPDT 5V @ 10A
R1 a R16	Resistencia	1,2 k Ω
Q1 a Q16	Transistor NPN	2N2222
L1 a L8	Solenoide	8V
Arduino	Arduino	Arduino Leonardo

CÓDIGO SECUENCIA DE ACTIVACIÓN

```
#define SOL1 4
#define SOL2 5
#define SOL3 6
#define SOL4 7
#define SOL5 8
#define SOL6 9
#define SOL7 3
#define SOL8 2
#define BOM1 A1
#define BOM2 A0
#define BOM3 13
#define BOM4 A2
#define BOM5 11
#define BOM6 10
#define BOM7 A3
#define BOM8 12

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(SOL1, OUTPUT);
  pinMode(SOL2, OUTPUT);
  pinMode(SOL3, OUTPUT);
  pinMode(SOL4, OUTPUT);
  pinMode(SOL5, OUTPUT);
  pinMode(SOL6, OUTPUT);
  pinMode(SOL7, OUTPUT);
  pinMode(SOL8, OUTPUT);
  pinMode(BOM1, OUTPUT);
  pinMode(BOM2, OUTPUT);
  pinMode(BOM3, OUTPUT);
  pinMode(BOM4, OUTPUT);
```

```

    pinMode(BOM5, OUTPUT);
    pinMode(BOM6, OUTPUT);
    pinMode(BOM7, OUTPUT);
    pinMode(BOM8, OUTPUT);

}

void loop()

{
    //inflado mod1 - desinflado mod7
    digitalWrite(BOM1, HIGH);
    digitalWrite(SOL7, HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(BOM1, LOW);
    digitalWrite(SOL7, LOW);
    delay(100);

    //inflado mod2 - desinflado mod8
    digitalWrite(BOM2, HIGH);
    digitalWrite(SOL8, HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(BOM2, LOW);
    digitalWrite(SOL8, LOW);
    delay(100);

    //inflado mod3 - desinflado mod1
    digitalWrite(BOM3, HIGH);
    digitalWrite(SOL1, HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(BOM3, LOW);
    digitalWrite(SOL1, LOW);
    delay(100);

    //inflado mod4 - desinflado mod2
    digitalWrite(BOM4, HIGH);
    digitalWrite(SOL2, HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(BOM4, LOW);
    digitalWrite(SOL2, LOW);
    delay(100);

    //inflado mod5 - desinflado mod3
    digitalWrite(BOM5, HIGH);
    digitalWrite(SOL3, HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(BOM5, LOW);
    digitalWrite(SOL3, LOW);
    delay(100);
}

```

```
//inflado mod6 - desinflado mod4
digitalWrite(BOM6, HIGH);
digitalWrite(SOL4, HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(BOM6, LOW);
digitalWrite(SOL4, LOW);
delay(100);

//inflado mod7 - desinflado mod5
digitalWrite(BOM7, HIGH);
digitalWrite(SOL5, HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(BOM7, LOW);
digitalWrite(SOL5, LOW);
delay(100);

//inflado mod8 - desinflado mod6
digitalWrite(BOM8, HIGH);
digitalWrite(SOL6, HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(BOM8, LOW);
digitalWrite(SOL6, LOW);
delay(100);
}
```

ANEXO D

GUÍA DE FABRICACIÓN DE MÓDULOS

Los módulos se fabrican con resina de silicona líquida, por lo que se hace necesario utilizar moldes para la fabricación. Los planos de los moldes en el Anexo A se identifican como “Molde X”, con X una letra del abecedario desde la A a la F. Entre los planos se encuentra también el “Marco Imán” que no corresponde a un molde, sino a una pieza del módulo. La lista de piezas, materiales y moldes necesarios para la fabricación de un módulo es la siguiente:

- Molde A x1
- Molde B x1
- Molde C x6
- Molde D x6
- Molde E x1
- Molde F x1
- Marco Imán x6
- Imán de neodimio 6x2 mm x6
- 7 gr. total de resina de silicona Ecoflex 00-30

Herramientas útiles para la fabricación:

- Mezclador
- Paleta
- Balanza electrónica (precisión 0.01 gr.)
- Alicata cortador de cable
- Corta cartón
- Aguja
- Clavo
- Manguera flexible (Ø3 mm.)

Armado de moldes 1 y 2:

- El molde A posee 5 agujeros con cambio de sección, en cada uno se inserta un molde C de forma que las paredes exteriores del molde A quedan lisas. Cuando ya están insertados los moldes C se procede a ensamblar cinco moldes D en las puntas que quedaron en las paredes internas (ver Figura C1).
- El molde F posee un único agujero con cambio de sección, donde se inserta el molde C y luego el molde D de forma análoga que con el molde A (ver Figura C2).

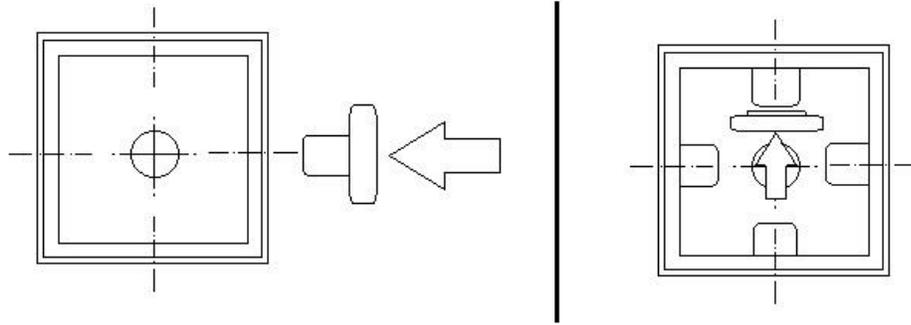


Figura C1 – Pasos de ensamblaje para molde A

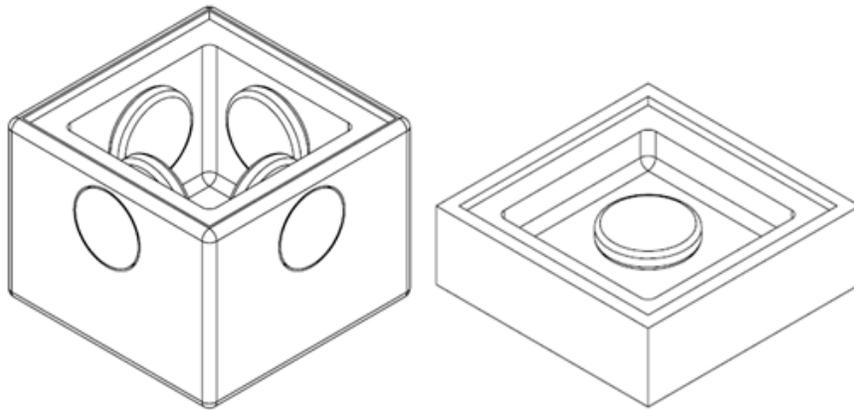


Figura C2 – Molde 1 (izq.) y Molde 2 (der.) ensamblados para fabricación

Procedimiento de fabricación:

1. Colocar en el mezclador 3.5 gr de resina parte A y 3.5 gr. de resina parte B, midiendo con la balanza electrónica (limpiar paleta con que se extrae resina para cada parte, para evitar curado dentro del envase).
2. Mezclar bien la resina con la paleta durante un minuto aproximadamente, raspando bordes y fondo del mezclador.
3. Colocar resina en Molde 1 por una de las esquinas, dejando que fluya por el fondo para evitar la formación de burbujas. Es recomendable mojar con resina los intersticios entre los moldes D y A. Llenar molde hasta $\frac{3}{4}$ del espacio.
4. Colocar resina en Molde 2 por una esquina, análogo al procedimiento del Molde 1 para evitar burbujas. Llenar hasta el borde interno.
5. Para el Molde 1, tapar con molde B (ver Figura C3) lentamente, evitando formar burbujas en la superficie del molde B. Rellenar por las aberturas de las esquinas hasta que la resina se rebase levemente.

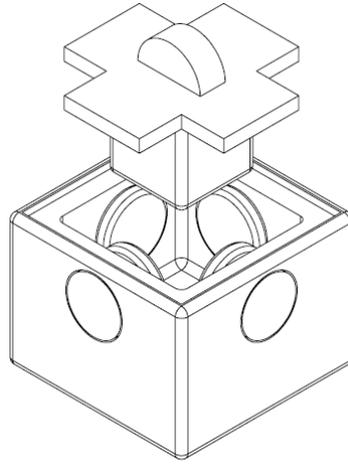


Figura C3 – Ensamblaje molde B

6. Esperar 5 a 10 minutos hasta que la superficie de la resina en el Molde 2 esté viscosa y tapar con molde E (ver Figura C4). Presionar levemente para que no quede aire atrapado.

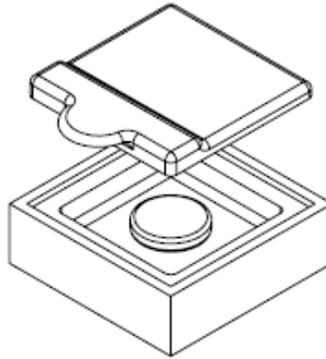
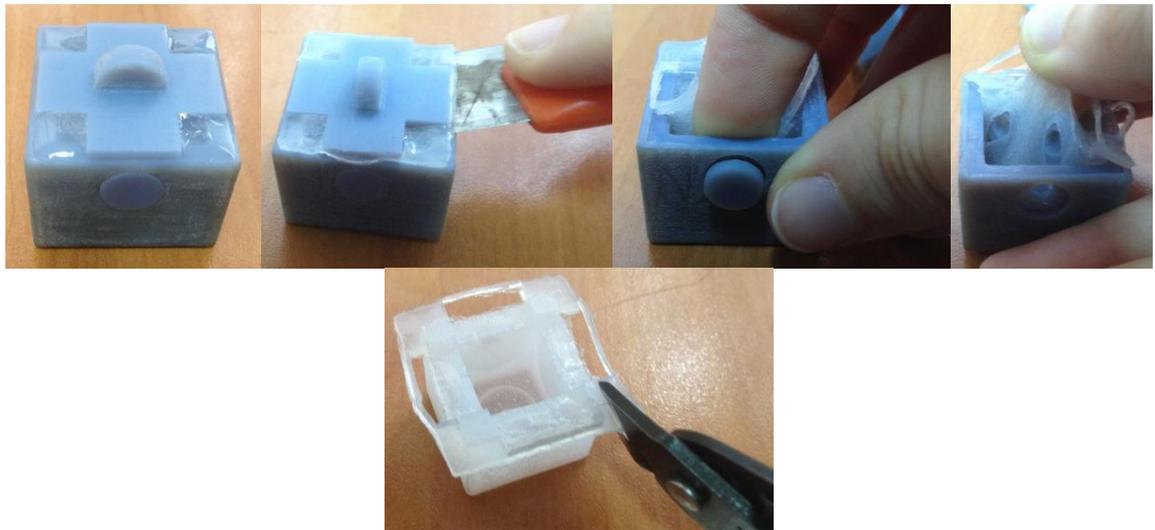
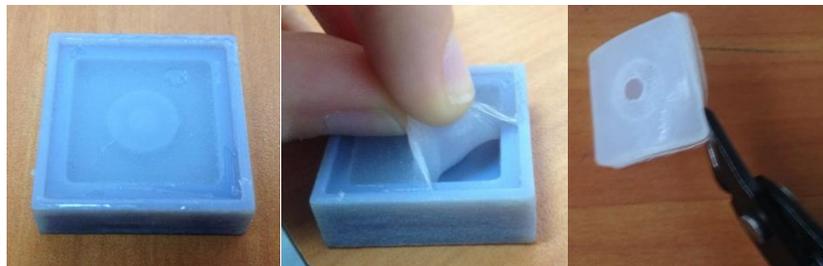


Figura C4 – Ensamblaje molde E

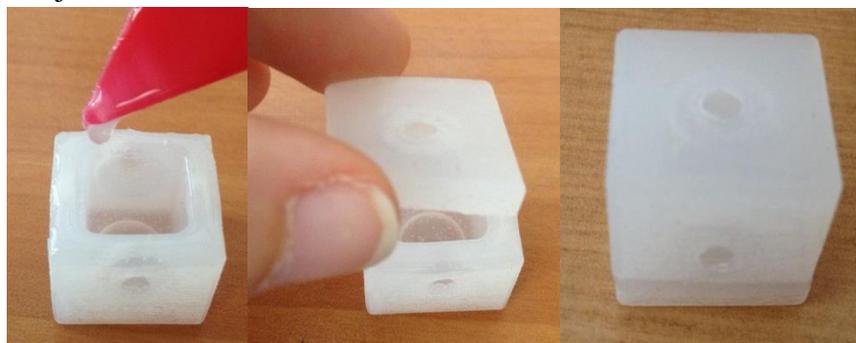
7. Esperar al menos 4 horas para completar el curado de la resina.
8. Desmoldar del Molde 1 separando la silicona manualmente de las aberturas, luego retirar el molde B haciendo palanca con un corta cartón. Separar la silicona del molde con ayuda de la hoja si fuera necesario. Una vez retirado el molde B, desmoldar con las manos las paredes, lo suficiente para separar los moldes C y D, y empujar molde C hacia afuera. Luego de desensamblar los moldes C, tirar la silicona desde las esquinas para desmoldarla del molde A. Finalmente retirar moldes D abriendo los orificios dejados por la unión de moldes C y D. Cortar con alicate cortador de cable las rebabas, dejando plana la superficie superior.



9. Desmoldar del Molde 2 retirando directamente el molde E. Luego desmoldar con las manos la silicona, tirando desde una esquina cuidando que no se raje la zona de unión entre los moldes C y D. Retirar el molde D de forma análoga a la aplicada para el Molde 1. Cortar rebabas con alicate cortador de cable.

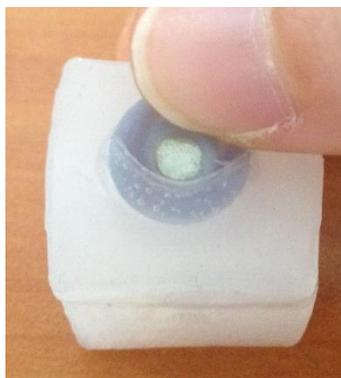


10. Preparar 0.5 gr de resina (0.25 gr parte A y 0.25 gr parte B, guiarse por pasos 1 y 2).
 11. Colocar resina en toda la superficie superior de la silicona del Molde 1 y presionar despacio la silicona del Molde 2 con el orificio mirando hacia afuera del cubo. Cuidar que los lados cuadren y dejar secando durante al menos una hora con la cara que se acaba de pegar hacia abajo.

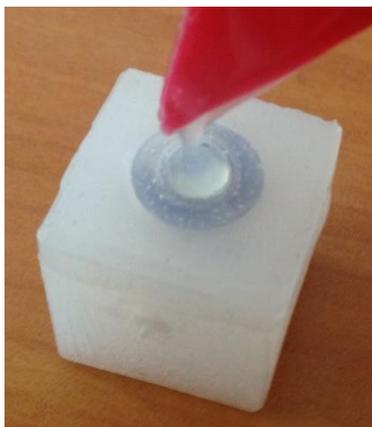


12. Colocar tres imanes de neodimio en un Marco Imán cada uno. Revisar el signo del polo que se ve por el orificio del Marco Imán y colocar otros tres imanes en marcos, pero con posición opuesta. De esta forma se tienen tres pares de imanes que se atraen por la cara que queda expuesta en el Marco imán.

13. Luego de esperar que cure la silicona, verificar que la soldadura haya quedado bien (podría ser necesario desbarbar). Con la aguja pinchar desde un vértice inferior hasta la cavidad central, luego usar el mismo canal hecho para introducir el clavo (aumentar el diámetro del canal). Retirar el clavo e insertar la manguera flexible para inyectar aire y verificar que no hay fugas.
14. Verificado que no existen fugas, insertar los imanes con marco en los “bolsillos” de cada cara formados por la unión de los moldes C y D, con la cara expuesta del imán mirando hacia afuera. Cuidar que la distribución sea tal que en caras opuestas del cubo hayan imanes con polos opuestos.



15. Preparar 0.5 gr de resina, de la misma forma que en el paso 10.
16. Colocar una gota aproximadamente de resina sobre un imán, esparcir bien con la paleta (debajo del pliegue del bolsillo también) de forma que quede una capa de resina cubriendo la parte expuesta del imán y el marco. Dejar secar al menos una hora con la cara donde se aplicó la resina mirando hacia arriba.



17. Repetir los pasos 15 y 16 con cada cara hasta que estén cubiertos todos los imanes.