



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Grado En Ingeniería Electrónica Industrial Y  
Automática**

**Diseño y desarrollo de un prototipo de  
BHRM**

**Autor:**

**Chumillas Fraj, Miguel Ángel**

**Tutores:**

**González Sánchez, José Luis**

**Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática**

**Perez Rueda, M.<sup>a</sup> Ángeles**

**Dpto CMelM, EGI, ICGyF, IM, IPF**

**Valladolid, noviembre de 2019**



## Diseño y desarrollo de un prototipo de BHRM





### Agradecimientos

*A mi familia, porque gracias a ellos soy quien soy. Quiero agradecer a mis padres su apoyo incondicional y su paciencia, pues durante toda mi vida han estado en los momentos buenos y malos, animándome siempre a seguir adelante. A mi hermano, que siempre ha sido para mí un ejemplo a seguir.*

*También quiero agradecer a mi pareja, por su ayuda y aliento, por el esfuerzo que ha hecho durante estos años en conseguir que esto siga adelante.*

*Por supuesto agradecer a mis amigos, que siempre han estado ahí para ayudar y para desconectar cuando ha hecho falta. Algunos de ellos han sido también compañeros de grado, sin ellos habría sido todo mucho más difícil.*

*Por último, quiero agradecer a M.<sup>a</sup> Ángeles Pérez y a José Luis González, por haberme guiado a lo largo de este inmenso proyecto, por darme magníficas ideas y por su apoyo en llevarlo a cabo de la mejor manera posible.*



## Diseño y desarrollo de un prototipo de BHRM





## RESUMEN

El mundo de la robótica se encuentra cada día más presente en varios aspectos de la vida cotidiana, posicionándose como alternativa a tecnologías empleadas con anterioridad. Una de las áreas más interesantes es la robótica médica.

En la medicina poco a poco se van utilizando métodos cada vez más eficaces y menos invasivos para el paciente, por ello surge la necesidad de incluir los avances más relevantes de robótica en diversos procedimientos médicos existentes.

En el presente trabajo se ha buscado la construcción de un prototipo de un robot ápodo, modular e hiper redundante, que tendrá como objetivo ser de ayuda en el ámbito de la exploración médica en entornos quirúrgicos.

La tecnología que emplearemos principalmente será la de materiales con memoria de forma, que nos permitirán una miniaturización del prototipo en un futuro.

Este proyecto forma parte y continúa una investigación amplia, en la que se encuentran varios proyectos que tratan este tema. En él se investigarán las propuestas desarrolladas con anterioridad, se diseñará un prototipo y se fabricará parte del robot.

### **Palabras clave:**

Robot, ápodo, módulo, modular, hiper-redundante, Nitinol, memoria de forma, endoscopia.





## ABSTRACT

Nowadays robotic systems are all around us, positioning itself as an alternative to previously used technologies. One of the most interesting areas is medical robotics.

For instance, in medicine are being used little by little less invasive methods in surgery. Therefore, we must include the most important developments in robotics in some medical procedures.

In the present work we have sought the setting-up of a prototype of an apodal, modular and hyper redundant robot, which will aim to be helpful in medical exploration field, specifically in surgical environments.

The technology that we will mainly use will be the shape memory materials, which will allow us the prototype miniaturization in the future.

This project is part of a wide investigation, in which there are several projects that deal with this topic. In our report, we will investigate previously developed proposals, a prototype will be designed, and a few parts of the robot will be manufactured.

### **Key words:**

Robot, apode, module, modular, hyper-redundant, Nitinol, shape memory, endoscopy.





## LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1: A) NO REDUNDANTE. B) REDUNDANTE [MARTÍN, 2017].	12
FIGURA 2: COLONOSCOPIA CONVENCIONAL	12
FIGURA 3: APARATO DIGESTIVO	17
FIGURA 4: ANATOMÍA DE LA BOCA (TERESE WINSLOW LLC)	18
FIGURA 5: CLASIFICACIÓN DE LA FARINGE (WINSLOW LLC)	18
FIGURA 6: ANATOMÍA DEL ESÓFAGO	19
FIGURA 7: SITUACIÓN Y COMPONENTES DEL ESTÓMAGO (FRAN MILLNER 2017)	20
FIGURA 8: INTESTINO DELGADO - DUODENO, YEYUNO E ÍLEON	21
FIGURA 9: INTESTINO GRUESO	22
FIGURA 10: ENDOSCOPIO	22
FIGURA 11: ENDOSCOPIA VIRTUAL	24
FIGURA 12: CÁPSULA ENDOSCÓPICA	25
FIGURA 13: BRAZO ACTUADO MEDIANTE TENDONES	25
FIGURA 14: SERIE DE ROBOTS DE SNAKE ROBOTS	27
FIGURA 15: ROBOT TROMPA DE ELEFANTE	28
FIGURA 16: HYPERFINGER, 2003	28
FIGURA 17: TRES MÓDULOS EN REPOSO JUNTO A CUATRO MÓDULOS ACTIVADOS (LAGUNA, 2015)	31
FIGURA 18: DISEÑO 3D, MÓDULO CON ACTUADORES (ÚBEDA, R.)	32
FIGURA 19: ACTUADORES (HONTIYUELO, 2018)	32
FIGURA 20: IZQUIERDA - ELEVACIÓN (TODOS LOS ACTUADORES ACTIVADOS);	33
FIGURA 21: CONFIGURACIONES ADOPTADAS POR LOS MÓDULOS Y ESTADO DE LOS ACTUADORES CORRESPONDIENTES (VERDE=ACTIVADO (1), BLANCO=DESACTIVADO (0)) (HONTIYUELO, 2018)	34
FIGURA 22: CONFIGURACIONES DE LOS ACTUADORES	35
FIGURA 23: GRADO DE LIBERTAD $\alpha$ (HONTIYUELO, 2018)	36
FIGURA 24: GRADO DE LIBERTAD $\delta$ (HONTIYUELO, 2018)	36
FIGURA 25: GRADO DE LIBERTAD $\theta$ (HONTIYUELO, 2018)	36
FIGURA 26: ACTUADOR LINEAL	42
FIGURA 27: ACTUADOR UTILIZADO EN AEROMODELISMO	42
FIGURA 28: FUNCIONAMIENTO DEL IMÁN Y LA BOBINA	43
FIGURA 29: MOTOR PASO A PASO	43
FIGURA 30: MICRO MOTOR DC UTILIZADO	43
FIGURA 31: DIAGRAMA DE TRANSFORMACIÓN DEL NITINOL	44
FIGURA 32: ACTUADOR PROPUESTO POR HERNÁNDEZ, S EN 2018	45
FIGURA 33: ACTUADOR FLEXIBLE	46
FIGURA 34: PALANCA RÍGIDA	46
FIGURA 35: PRUEBAS DE ACTUACIÓN CON MOTORES	48
FIGURA 36: CONTRACCIÓN DEL NITINOL, (HERNÁNDEZ, S 2018)	49
FIGURA 37: ELEVACIÓN DEL ACTUADOR (HERNÁNDEZ, S. 2018)	50
FIGURA 38: ACTUACIÓN DEL CABLE TIPO BISAGRA	51
FIGURA 39: ACTUACIÓN DEL CABLE RECTO	52
FIGURA 40: MEMORIZACIÓN DE FORMA DEL NITINOL	52
FIGURA 41: RETRACCIÓN DEL NITINOL PREVIAMENTE MEMORIZADA LA FORMA DE RIZO	53
FIGURA 42: TABLA DE CARACTERÍSTICAS DEL FLEXINOL	54
FIGURA 43: TEMPERATURA ALCANZADA POR EL NITINOL	56
FIGURA 44: ESQUEMA DE COMUNICACIÓN	59
FIGURA 45: COMUNICACIÓN I2C EN ARDUINO (LLAMAS, L.)	60



FIGURA 46: COMUNICACIÓN SPI (LLAMAS, L.) .....	61
FIGURA 47: EJEMPLO DE COMUNICACIÓN (HERNÁNDEZ, S.).....	62
FIGURA 48: IMAGEN DEL POTENCIÓMETRO .....	63
FIGURA 49: TRANSISTOR EN EC.....	64
FIGURA 50: VARIACIÓN DE LA HFE CON RESPECTO A $I_C$ .....	65
FIGURA 51: PLACA DE CIRCUITO IMPRESO (HERNÁNDEZ, S.).....	66
FIGURA 52: ESQUEMA FINAL .....	67
FIGURA 53: PWM GENERADO CON ARDUINO .....	68
FIGURA 54: ELEVACIÓN DEL ACTUADOR CON EL CIRCUITO DISEÑADO .....	68
FIGURA 55: MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM) .....	69
FIGURA 56: ESTRUCTURA DE UN PROGRAMA .....	73
FIGURA 57: IMAGEN DE LAS PARTES DE UN ARDUINO [TEMASDEDISEÑOYMANUFACTURA/ARDUINO] .....	74
FIGURA 58: ATTINY84 ENCAPSULADO SOIC14.....	75
FIGURA 59: PINES DE CONEXIONADO DEL ATTINY84 .....	76
FIGURA 60: ADICIÓN DE NUEVO GESTOR DE TARJETAS.....	77
FIGURA 61: CONFIGURACIÓN ARDUINO COMO ISP .....	77
FIGURA 62: ADAPTADOR IMPRESO .....	78
FIGURA 63: ADAPTADOR SOIC-DIP.....	79
FIGURA 64: ESQUEMA DE CONEXIONADO .....	79
FIGURA 65: CONFIGURACIÓN ARDUINO COMO ISP .....	80
FIGURA 66: MEMORIZACIÓN DE FORMA DEL NITINOL.....	86
FIGURA 67: TORRE DISPUESTA POR MÓDULOS. (ÚBEDA, R 2018) .....	88
FIGURA 68: FOTO AL DETALLE DE LA UNIÓN ENTRE MÓDULOS. (ÚBEDA, R 2018). .....	88
FIGURA 69: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ACTUADOR. ....	89
FIGURA 70: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CUERPO DEL MÓDULO .....	90
FIGURA 71: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA BASE .....	91
FIGURA 72: BASE INFERIOR .....	92
FIGURA 73: TAPA SUPERIOR .....	92
FIGURA 74: CÚPULA .....	93
FIGURA 75: PLACA DE CIRCUITO IMPRESO EN PROCESO DE SOLDADURA.....	94
FIGURA 76: MÓDULO COMPLETO (DISEÑO 3D, ÚBEDA, R. 2018) .....	96
FIGURA 77: ENSAMBLAJE DEL ACTUADOR .....	97
FIGURA 78: MÓDULO MONTADO.....	98
FIGURA 79: CONSOLA DE CONTROL .....	99



# Índice

Capítulo 1. Introducción y Objetivos.....	9
1.1. Motivación .....	11
1.2. Problemática .....	12
1.3. Justificación del proyecto .....	13
1.4. Estructura del proyecto .....	13
Capítulo 2. Estado del Arte en Robots Ápodos Hiper Redundantes .....	15
2.1. Introducción.....	17
2.2. Aparato digestivo: métodos de exploración .....	17
2.3. Exploración de geometrías complejas.....	25
Capítulo 3. Diseño funcional del Robot Ápodo Modular Hiper redundante..	29
3.1. Introducción.....	31
3.2. Concepto modular.....	31
3.3. Diseño del módulo .....	31
3.4. Estudio del movimiento .....	32
Capítulo 4. Mecanismos de actuación.....	39
4.1. Introducción.....	41
4.2. Alternativas de actuación .....	41
4.3. Diseño del actuador.....	45
4.4. Formas de actuación .....	45
4.5. Pruebas y selección .....	46
4.6. Ensayos realizados con flexinol .....	49
Capítulo 5. Comunicaciones y Control. Esquema electrónico.....	57
5.1. Comunicación.....	59
5.2. Esquema general del sistema.....	59
5.3. Modos de control .....	62
5.4. Componentes .....	63
5.5. Circuito electrónico .....	64
Capítulo 6. Programación de Microprocesadores.....	71
6.1. Introducción.....	73
6.2. Arduino.....	73



6.3.	Attiny84 .....	75
6.4.	Librerías <b>I2C</b> .....	80
6.5.	Prueba conjunta .....	81
Capítulo 7.	Construcción de Prototipo funcional.....	83
7.1.	Introducción.....	85
7.2.	Lista de materiales .....	85
7.3.	Memorización de forma del nitinol .....	85
7.4.	Diseños 3d: impresión.....	86
7.5.	Soldadura de componentes .....	93
7.6.	Programación .....	95
7.7.	Secuencia del montaje de un módulo .....	96
7.8.	Comprobación del prototipo.....	99
7.9.	Problemas encontrados y soluciones adoptadas.....	99
Capítulo 8.	Conclusiones, mejoras propuestas y futuros desarrollos .....	103
8.1.	Conclusiones:.....	104
8.2.	Mejoras propuestas y futuros desarrollos.....	106
Capítulo 9.	Bibliografía .....	109



# Capítulo 1. Introducción y Objetivos





## 1.1. MOTIVACIÓN

En una sociedad en la que los avances tecnológicos son cada vez más acusados, sería lógico pensar que gran parte de ellos sean utilizados en áreas tan importantes como es la medicina. En el mundo de la robótica, se investiga y se ha investigado mucho sobre este tema. No obstante, a pesar de utilizarse robots en campos como la cirugía, siempre hay cabida a nuevos desarrollos, ya que se encuentra en continuo movimiento.

Uno de los campos más estudiados es el de la exploración y el diagnóstico. Sin embargo, a pesar de ello, todavía no existe un procedimiento inocuo para el paciente. Todas las tecnologías que se utilizan, por ejemplo en la endoscopia, pueden causar molestias al paciente o ser poco toleradas por ellos. Principalmente, las mejoras que se investigan se basan en aumentar la visibilidad que ofrece, así como el método de desplazamiento a través del sistema digestivo y los nuevos materiales empleados en su construcción. Por ello, los robots podrían, a priori, ofrecer grandes beneficios en este aspecto, sobre todo en el área de endoscopios autónomos o semi autónomos. Permitiría guiar al robot a la zona deseada, evitando en muchos casos el contacto con tejidos internos, mejorando en gran medida los problemas causados por un endoscopio tradicional. [Muñoz 2013].

De acuerdo con esto, se investigan las distintas posibilidades en la elección de los tipos de robot, siendo los basados en la naturaleza animal los que más ventajas nos aportan. Concretamente, el movimiento de una serpiente presenta ciertas características que podrían interesarnos, y por ello se estudian los robots ápodos hiper redundantes. Estos serían capaces de desplazamientos suaves con una gran precisión y con la capacidad de evitar obstáculos sin muchas complicaciones [Saldaña, 2017].

Los robots hiper redundantes poseen un gran número de grados de libertad, por lo que permite mediante muchos actuadores binarios producir un movimiento continuo y fluido, pudiendo funcionar incluso aunque falle alguno de sus grados de libertad. Además tienen acceso a zonas que serían inalcanzables de otro modo, o al menos sin provocar fricción en el giro de estos, podemos observarlo en la Figura 1 [Martín, 2017].



Figura 1: a) No redundante. b) Redundante [Martín, 2017].

## 1.2. PROBLEMÁTICA

El cáncer es una de las enfermedades más acusadas en la actualidad, y es crítica una detección precoz para poder tratarse. Si el cáncer se detecta previa metástasis, la tasa de recuperación aumenta considerablemente. En concreto, el cáncer de colon es uno de los más habituales, siendo el tercero más común en hombres y el segundo en mujeres [Thackur, 2013 y Liu, 2012].

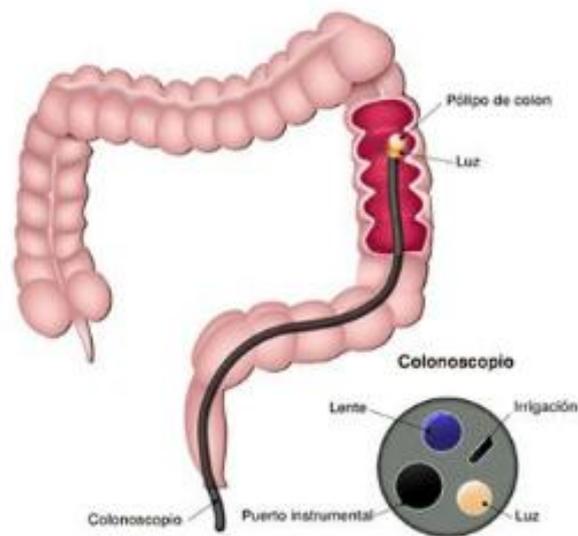


Figura 2: Colonoscopia convencional

En la actualidad, a pesar de todos los avances disponibles, el método más utilizado sigue siendo la colonoscopia convencional. Este proceso se ejecuta con una herramienta en forma de tubo flexible, con iluminación, cámara, irrigación y un espacio para otros instrumentos como elementos punzantes, mostrados en la Figura 2.



. Este método cuenta con limitaciones obvias, pues la guía del tubo es el propio recto, pudiendo causar diversas irritaciones y molestias al paciente o, en el peor de los casos, heridas y sangrados.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

En consecuencia de lo anterior, se busca mejorar y buscar alternativas a los métodos tradicionales, tratando de solventar los problemas o inconvenientes que estos tienen. Además, el diagnóstico y tratamiento no solo tendrían menos efectos colaterales, sino que serían más eficaces y controlados.

#### **1.3.1. Objetivos**

El objetivo final del proyecto será construir parte de un prototipo funcional de un robot BHRM (Binary Hyper-Redundant Manipulator). Este constará de uno o varios módulos de ejemplo, en un tamaño muy superior al que debería tener en su aplicación final. El prototipo nos servirá para ejecutar diversas pruebas, ver los problemas y ventajas que presenta y, en próximos estudios, tratar de miniaturizarlo con todo lo aprendido en este prototipo a gran escala.

Para ello habrá tres etapas claramente diferenciadas:

- Se comenzará estudiando el campo donde operará nuestro robot, es decir, se investigarán con detenimiento las áreas del sistema digestivo en las que deberá desplazarse.
- Se establecerá una relación de los instrumentos de medida empleados actualmente y las tecnologías que se han implementado. A partir de ahí, estudiaremos la mecánica que tendrá nuestro robot para poder realizar las funciones deseadas en ese entorno.
- Por último, se elegirá el tipo de actuadores adecuado, y se construirá y programará un prototipo basado en uno o dos módulos pertenecientes a un robot ápodo hiper-redundante que sea capaz de realizar los movimientos y configuraciones deseadas.

### **1.4. ESTRUCTURA DEL PROYECTO**

Capítulo 1: Introducción y objetivos – En este capítulo se realizará una aproximación al tema de estudio y los objetivos a desarrollar.

Capítulo 2: Estado del Arte en Robots Ápodos Hiper Redundantes – A lo largo de este apartado se enfocará el contexto del proyecto, así como las distintas opciones de robot ápodo que se han desarrollado hasta la fecha.



Capítulo 3: Diseño funcional del Robot Ápodo Modular e Hiper redundante – En este capítulo se desarrollará una descripción del movimiento característico del robot, así como su diseño.

Capítulo 4: Mecanismos de Actuación – Se mencionarán las opciones estudiadas para la actuación del robot, centrándonos en la opción escogida.

Capítulo 5: Comunicaciones y Control – En este apartado se explicará el protocolo de comunicación elegido, así como el control implementado.

Capítulo 6: Programación de microcontroladores – En este capítulo se hará un análisis de la programación de los microcontroladores utilizados y del software implementado.

Capítulo 7: Construcción de prototipo funcional – Este capítulo tratará de la construcción del prototipo. En él se mencionarán las técnicas empleadas y las dificultades encontradas.

Capítulo 8: Conclusiones y futuros desarrollos – Capítulo de conclusión, en el que se elaborará un resumen del trabajo realizado y se comentarán futuras líneas de investigación.

Capítulo 9: Bibliografía – Relación de trabajos, páginas web y libros utilizados para la redacción del informe y la construcción del robot.

Anexos I – Anexos que contienen los programas completos que se han desarrollado, el esquema electrónico y el modo de operación.



# Capítulo 2. Estado del Arte en Robots Ápodos Hiper Redundantes



## 2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo estudiaremos, por un lado, el entorno de trabajo en el que trabajará nuestro futuro robot. Se mencionarán las nociones básicas del aparato digestivo humano, así como las opciones que existen para la exploración de este y cuáles se utilizan hoy en día con ese fin. Además, se investigará sobre el avance de los distintos robots que se han desarrollado a lo largo del tiempo con una geometría similar a la nuestra.

## 2.2. APARATO DIGESTIVO: MÉTODOS DE EXPLORACIÓN

Actualmente existen diversos métodos para la exploración visual mediante la intrusión de instrumentos en las cavidades internas del cuerpo humano. A continuación realizaremos un breve análisis de la fisiología en la que se realizan dichas inspecciones.

### 2.2.1. Anatomía del aparato digestivo

Comenzaremos por un análisis general de todo el aparato digestivo, para posteriormente detallar cada una de sus partes. El sistema digestivo ocupa gran parte de la mitad superior del cuerpo humano, tal y como observamos en la Figura 3.

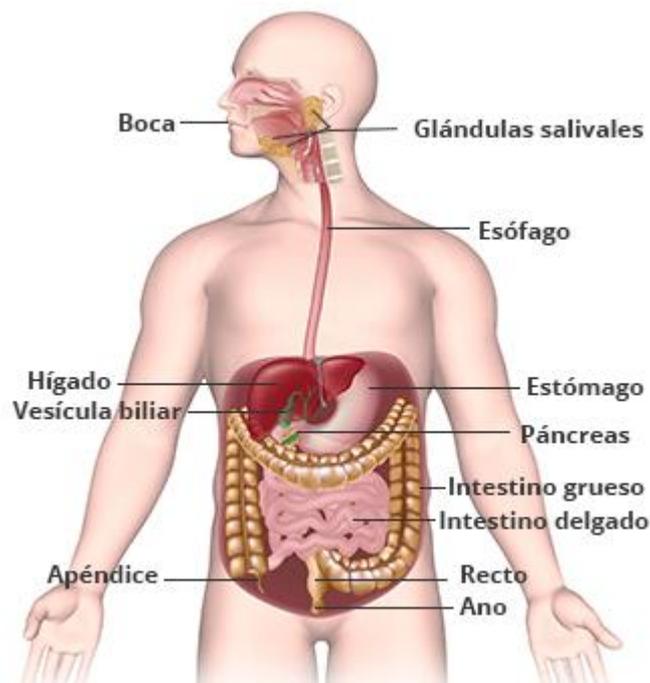


Figura 3: Aparato digestivo

A su paso, comprende seis partes claramente diferenciadas, como son la boca, el esófago, el estómago, el intestino delgado y el intestino grueso. Además,

dispone de una serie de glándulas como las salivales, el hígado y el páncreas. [Latarjet, 4ª edición, 2011].

Para nuestro cometido, nos interesará estudiar aquellas partes por las que el robot deba circular. Por ello, se estudiarán la boca, la faringe, el esófago, el estómago el intestino grueso y el delgado.

#### 2.2.1.1. Cavidad bucal

Cavidad de dimensiones variables que comunica el exterior a través de la boca, limitando en la parte trasera con la cavidad faríngea. Contiene los arcos dentales y la lengua, aunque sus constituyentes principales son los labios, las mejillas, el paladar y el piso de la boca. Cada una de sus partes se observa en la Figura 4 [Latarjet, 4ª edición, 2011]

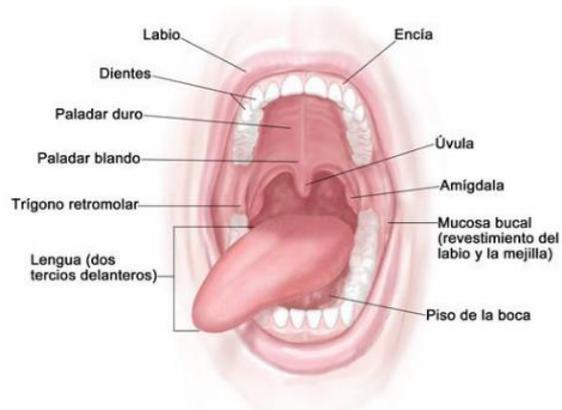


Figura 4: Anatomía de la boca (Terese Winslow LLC)

#### 2.2.1.2. Faringe

Canal muscular dispuesto verticalmente junto a la columna vertebral. Se encuentra situada tras las cavidades nasales, la cavidad bucal y la laringe.

Continúa hacia la parte inferior, donde se comparte el conducto entre las vías respiratorias y digestivas en el esófago. Tiene longitud variable en función de la deglución, siendo

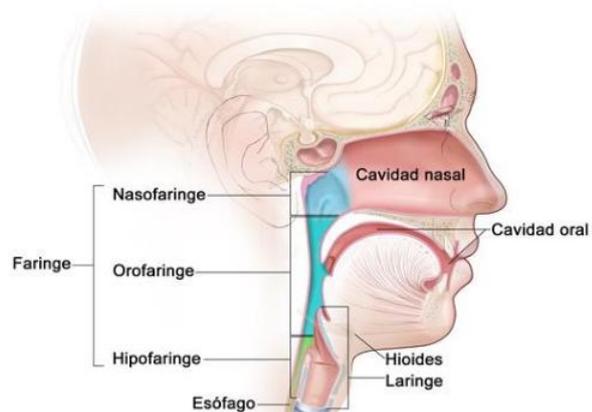


Figura 5: Clasificación de la Faringe (Winslow LLC)

aproximadamente 14 centímetros situando la cabeza en hiperextensión. Por su parte, el diámetro será de unos 5 centímetros en la parte superior, disminuyendo a 2 centímetros en el nivel inferior. Tendrá un papel importante en la respiración, la fonación, la audición y la alimentación.

Se divide en tres partes, la superior, la media y la inferior, aunque también pueden ser llamadas nasofaringe, orofaringe e hipofaringe respectivamente. [Latarjet, 4ª edición, 2011]

### 2.2.1.3. Esófago

Ese el conducto que une la faringe con el estómago es muscular y está recubierto por mucosa. El inicio se ubica en la parte inferior de la faringe, a la altura de la sexta o séptima vértebra cervical. Ocupa una parte del cuello y desciende hacia el tórax, recorriéndolo verticalmente. El final se encuentra en el tercio superior del estómago, a la altura de la décima u onceava vértebra torácica.

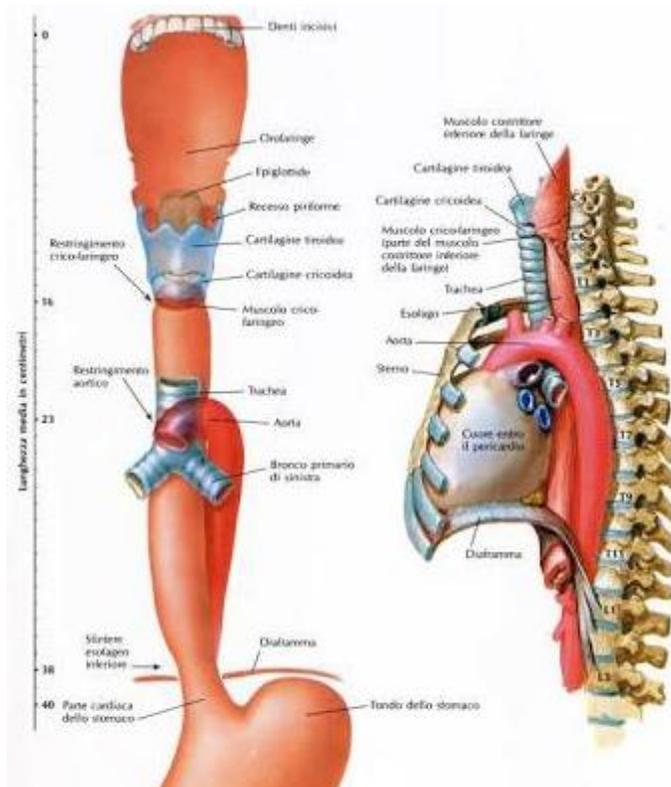


Figura 6: Anatomía del esófago

En un adulto medio, la longitud total son aproximadamente 30 centímetros, variando alrededor de 4 centímetros cuando la cabeza se extiende o se flexiona. Posee tres estrechamientos claramente diferenciados y, estando vacío, las paredes forman una hendidura estrecha, de entre 5 y 12 milímetros, que forman la denominada luz del esófago [Latarjet, 4<sup>a</sup> edición, 2011].

### 2.2.1.4. Estómago

Porción del aparato digestivo donde se acumularán los alimentos, a través de su mucosa segregará un potente jugo gástrico, que ayudará en la digestión de los alimentos ingeridos. Se sitúa bajo el hígado y el diafragma, aunque su tamaño, forma y situación cambiarán según la digestión y la posición del cuerpo.

Podemos dividirlo en tres partes, tal y como se observa en la figura. El fundus gástrico se trata de una pequeña curvatura situada en la parte superior, la cual habitualmente se encuentra llena de aire y es la zona más ancha del estómago. La sección situada en la mitad del estómago se llamará el cuerpo gástrico, tiene forma de cilindro y está limitado por las paredes laterales. Por último, la zona situada en el extremo inferior comunicará con la porción pilórica, que será la que termine en el duodeno, donde comenzará el intestino delgado. [Latarjet, 4ª edición, 2011].

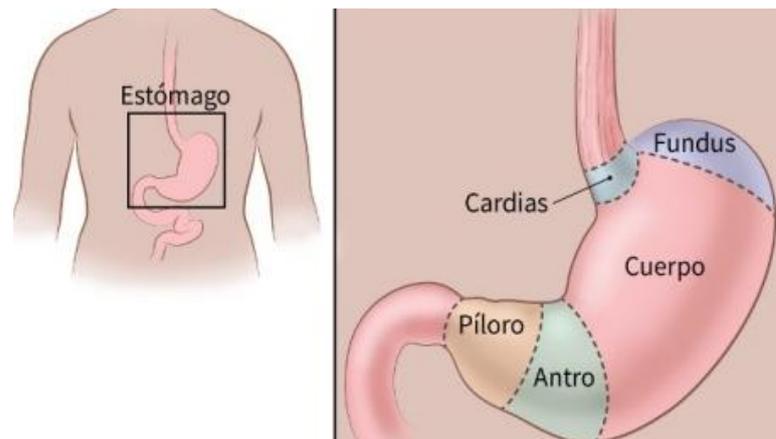


Figura 7: Situación y componentes del estómago (Fran Millner 2017)

#### 2.2.1.5. Intestino delgado

El intestino delgado se puede clasificar en tres partes, el duodeno, el yeyuno y el íleon. [Latarjet, 4ª edición, 2011]

- El duodeno: Es la parte donde se inicia el intestino delgado, y se encuentra entre el estómago y el yeyuno. Tiene morfología de anillo incompleto, y está situado junto al páncreas.
- El yeyuno y el íleon: No son claramente diferenciables, pues no tienen un límite definido. El yeyuno se encuentra próximo al duodeno, mientras que el íleon está cerca de la unión ileocecal. Su forma es tubular, y va decreciendo en diámetro, pasa de unos 25 milímetros a 15 o 20 en su tramo final. La longitud media de un adulto es de unos 7 metros.

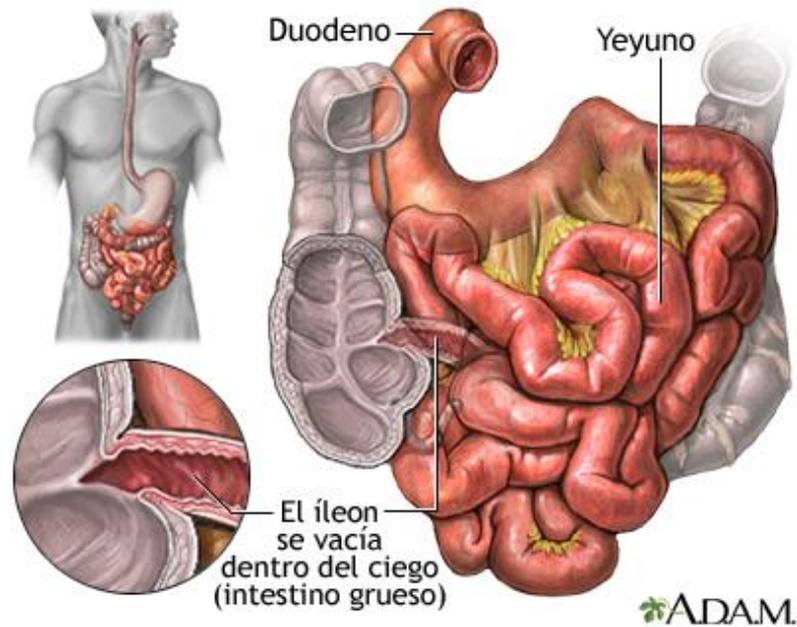


Figura 8: Intestino delgado - Duodeno, Yeyuno e Íleon

#### 2.2.1.6. Intestino grueso

El intestino grueso es la continuación del íleon, comienza en la válvula ileocecal hasta el exterior a través del ano. Está dividido en varias zonas diferenciadas, las cuales son [Latarjet, 4ª edición, 2011]:

- El ciego: Se encuentra en la parte inferior del orificio ileal.
- El colon: Está constituido por diferentes segmentos: colon ascendente, flexura cólica derecha, colon trasverso, flexura cólica izquierda, colon descendente y colon sigmoide.
- El recto: Continúa a partir del colon sigmoide, a unos 15 centímetros del ano, y llega hasta tres centímetros antes de la piel, donde continuará el canal anal.
- El canal anal: Último segmento del intestino grueso y, por ende, de todo el aparato digestivo. Tiene un trayecto de 3 o 4 centímetros hasta llegar al ano.

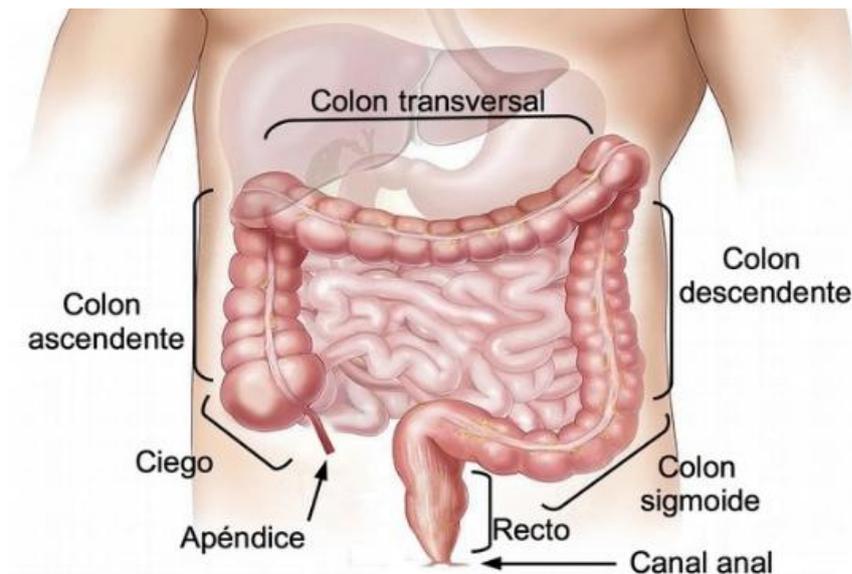


Figura 9: Intestino grueso

## 2.2.2. Electrónica en el cuerpo humano

En este apartado trataremos sobre los métodos actuales en la exploración del cuerpo, tanto los métodos más tradicionales como las posibles innovaciones que aparecen en el mercado a lo largo de los últimos años.

### 2.2.2.1. Endoscopia convencional

Procedimiento médico mediante el cual se examina un paciente mediante una herramienta llamada endoscopio. Este instrumento consta de un tubo delgado con una fuente de iluminación y una videocámara, aunque existen diversos tipos dependiendo de la zona a observar. [American Society of Clinical Oncology].

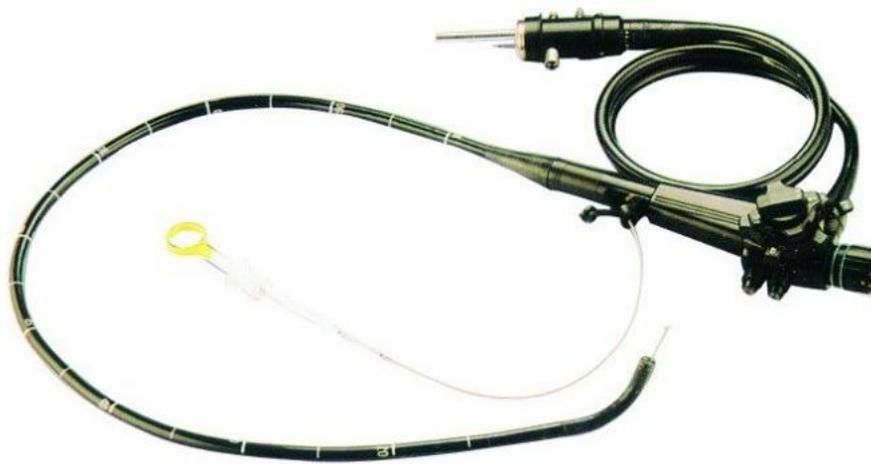


Figura 10: Endoscopio



#### 2.2.2.2. Tipos de endoscopia:

- Artroscopia: Examina las articulaciones a través de una pequeña incisión.
- Broncoscopia: Se encarga de examinar los bronquios y pulmones a través de la boca.
- Colonoscopia: Se utiliza para observar el colon y el intestino grueso, introduciéndolo a través del ano.
- Colposcopia: Sirve para examinar la vagina y el cuello uterino. No llega a introducirse sino que se colocará al inicio de la vagina.
- Cistoscopia: Examina el interior de la vejiga, Se introduce a través de la uretra.
- Esofagoscopia: Se utiliza para comprobar el estado del esófago a través de la boca.
- Gastroscopia: Introducido a través de la boca servirá para observar el estómago y el duodeno.
- Laparoscopia: Se realiza una pequeña incisión por la que se introduce, sirve para examinar el estómago, hígado o cualquier otro órgano abdominal.
- Laringoscopia: Observa la laringe a través de la boca.
- Neuroendoscopia: Mediante una incisión en el cráneo pueden observarse distintas áreas del cerebro.
- Proctoscopia: Se introduce a través del ano y se utiliza para examinar el recto y el colon sigmoide.
- Sigmoidoscopia: Se utiliza para poder observar el colon sigmoide.
- Toracoscopia: Mediante una pequeña abertura en el pecho, se logra examinar la pleura que recubre los pulmones y el exterior del corazón.

No obstante, de todos estos tipos de endoscopias, en este proyecto nos incumben principalmente aquellos relacionados con la endoscopia digestiva.

Estos serán la esofagoscopia, la colonoscopia, la proctoscopia y la sigmoidoscopia.

La endoscopia digestiva es la herramienta más utilizada en la detección de distintas afecciones que afectan al sistema digestivo. Es utilizado para problemas de úlceras, gastritis, para tomar muestras o biopsias e incluso para la detección y tratamiento del cáncer.

Es un método fiable que rara vez tiene complicaciones graves, aunque sí es invasivo y puede producir lesiones o perforaciones.

### 2.2.2.3. Endoscopia virtual

Es una técnica novedosa, que combina la toma de imágenes por radiología con un proceso computerizado, en el que se crea un modelo más completo de la zona a estudiar sin la necesidad de introducir un endoscopio. Todavía se sigue investigando en este tipo de tecnología, que es realizado en un equipo de resonancia magnética.

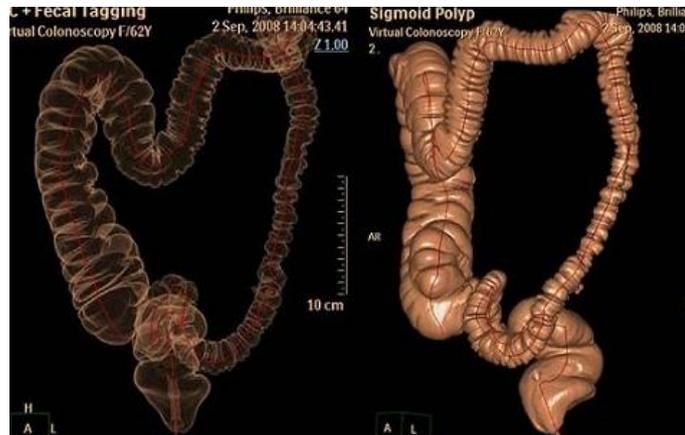


Figura 11: Endoscopia virtual

Los problemas que presenta son, entre otros, la dificultad de detectar pólipos u otras afecciones de tamaño reducido, la imposibilidad de la toma de muestras no consigue dar información de la mucosa y requiere interpretar una gran cantidad de datos.

### 2.2.2.4. Capsulas endoscópicas

Es una tecnología relativamente reciente que consiste en introducir una cápsula, dotada de una micro cámara e iluminación led. Se ingiere vía oral de forma similar a un comprimido y se elimina 8 horas después mediante el recto. Algunos modelos pueden controlarse a través de un imán externo. Las imágenes se visualizan posteriormente por medio de un ordenador, comunicándose la cápsula y un receptor situado en la cintura mediante radiofrecuencia.

Una de las ventajas principales que ofrece es la posibilidad de estudio de la totalidad del intestino delgado, lo cual no se lograba con el endoscopio, siendo muy útil en la detección de lesiones de este. Sin embargo, no permite la localización exacta de la lesión, no puede tomar biopsias por lo que no puede ser un método definitivo, e imposibilita realizar maniobras terapéuticas, siendo estas sus principales desventajas.

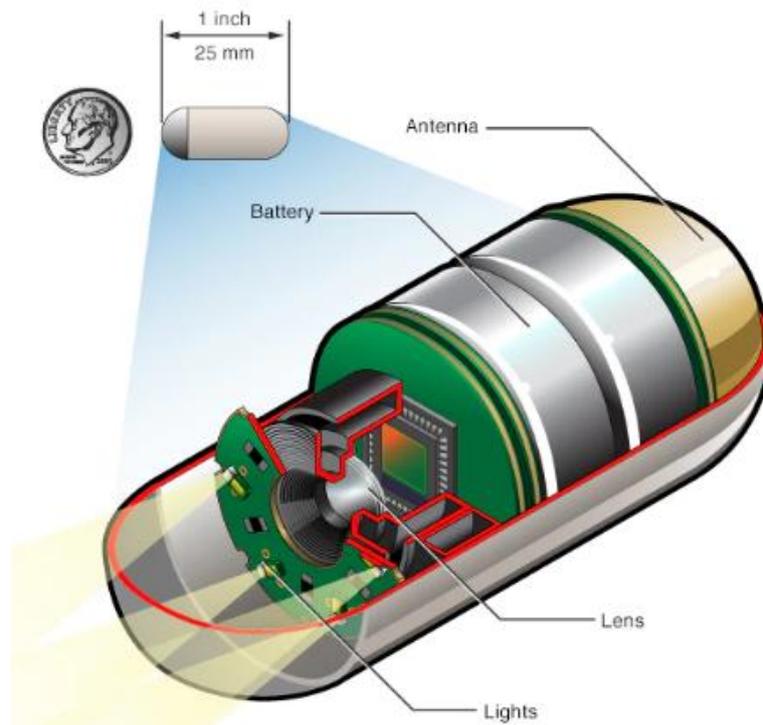


Figura 12: Cápsula endoscópica

## 2.3. EXPLORACIÓN DE GEOMETRÍAS COMPLEJAS

### 2.3.1. Robots hiper-redundantes

Existen multitud de investigaciones sobre robots hiper-redundantes con el fin de una aplicación médica, y desde los años 70 se han desarrollado una gran variedad de prototipos con este propósito. En este apartado se hará una relación de los algunos robots que hemos considerado interesantes por tener algún tipo de semejanza con lo que se desea estudiar en este proyecto [González, J. 2002], [Martín, C. 2017].

#### 2.3.1.1. “Tensor Arm”

Concebido en 1968 en el laboratorio de Física de la Marina, es un brazo actuado mediante tendones de nylon de forma similar a la actuación de los tendones en el cuerpo humano. Al traccionar de una parte del brazo, este girará en ese sentido.

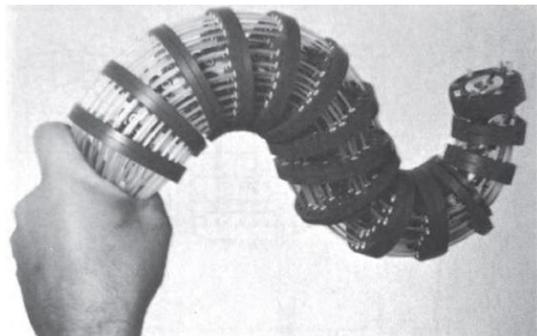
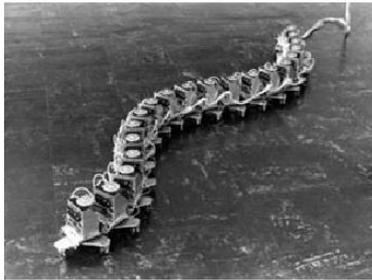


Figura 13: Brazo actuado mediante tendones

### 2.3.1.2. ACM III, R1, R2, R3, R4 y R5



ACM III



ACM R1



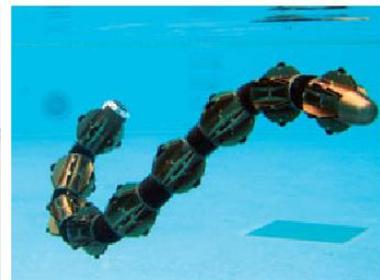
ACM R2



ACM R3



ACM R4



ACM R5

El ACM III fue el primer robot con forma y movimiento de serpiente real, desarrollado por el profesor Shigeo Hirose en 1972. Dispone de servos que permiten girar el módulo siguiente a izquierda o a derecha. En la parte posterior tenía una serie de ruedas para mejorar el deslizamiento y evitar un rozamiento innecesario con el suelo. Este robot fue mejorando y evolucionando por el laboratorio Hirose Fukushima hasta llegar al ACM R5, un robot anfibio capaz de realizar operaciones de rescate.

### 2.3.1.3. Snake Robot S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7

Fueron una serie de prototipos creados por el Dr. Galvin Miller desde principios de los 90 con el S1 hasta el 2005 con el último modelo el S7. Este último es, con diferencia, el más tecnológicamente avanzado, contando con multitud de sensores y una estudiada segmentación del robot, imitando el movimiento de una pitón.

En la Figura 14: Serie de Robots de Snake Robots se puede observar la serie completa de los siete robots.



Figura 14: Serie de Robots de Snake Robots

#### 2.3.1.4. Trompa de elefante

Robot desarrollado por Festo, basado en el modelo de Hannan y Walker en 2001 aunque este es mucho más reciente. Imita un tentáculo de un pulpo o la trompa de un elefante. Posee doce grados de libertad, y su movimiento se debe a cuatro fuelles neumáticos en cada uno de sus tres segmentos, teniendo un movimiento casi tan natural como sus modelos biónicos. Dispone de gran cantidad de sensorización y está preparado para robótica colaborativa [festo.com].

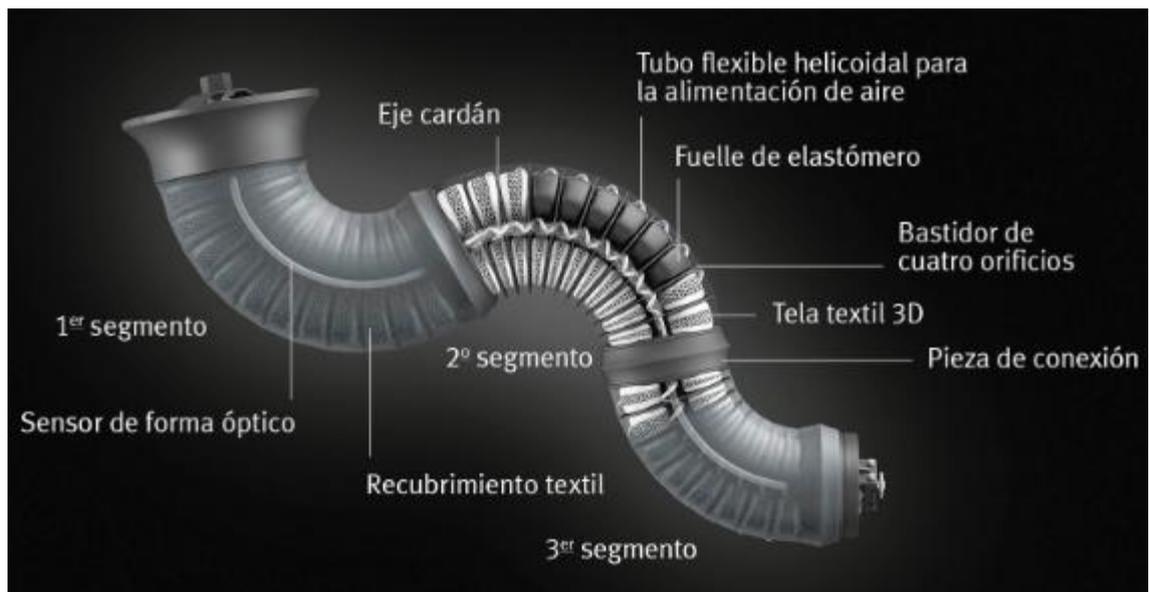


Figura 15: Robot trompa de elefante

### 2.3.1.5. Hyperfinger

Desarrollado en 2003, en una investigación a cerca de un endoscopio hiper redundante. Era actuado mediante tensores, y disponía de 9 grados de libertad en cada actuador.

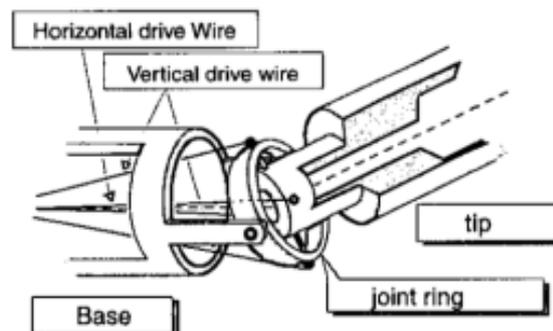


Figura 16: Hyperfinger, 2003



# Capítulo 3. Diseño funcional del Robot Ápodo Modular Hiper redundante



### 3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se tratará de enfocar el diseño del robot de nuestro estudio. Estudiaremos el concepto general del mismo, así como los tipos de movimientos que podrá ejecutar.

### 3.2. CONCEPTO MODULAR

El robot tendrá una geometría tubular, que constará de un número de módulos exactamente iguales, de forma que tenga un elevado número de grados de libertad, y con ello una movilidad notable. Cada módulo podrá ejecutar un movimiento único que, aunque serán variaciones pequeñas debido a la naturaleza del mismo, podremos tener un posicionamiento final preciso. Además, gracias a este mismo diseño hiper redundante, podrá adoptar formas complejas, con el fin de desplazarse por prácticamente cualquier entorno sin dificultad. El prototipo mostrado en la Figura 17, se trata de un prototipo realizado anteriormente con polímeros electrostáticos (IPMCs), y partiremos de esa idea para estudiar el movimiento y la actuación en nuestro proyecto [Laguna, 2015].

Más adelante, siguiendo esta filosofía, trataremos de buscar alternativas a los IPMCs.

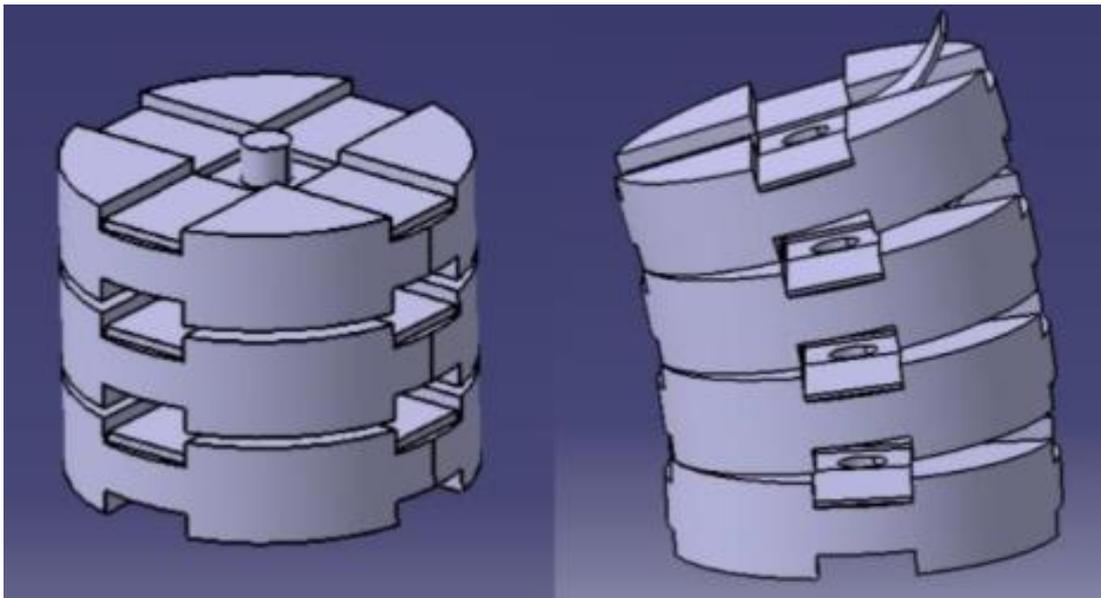


Figura 17: Tres módulos en reposo junto a cuatro módulos activados (Laguna, 2015)

### 3.3. DISEÑO DEL MÓDULO

Cada módulo tendrá una forma cilíndrica, de forma que al superponer uno sobre otro lograremos esa geometría que se comentaba en el apartado anterior. En busca de un movimiento relativo entre módulos para el

desplazamiento de este, la solución más óptima de implantación serán cuatro actuadores dispuestos uno frente a otro dos a dos, como se observa en la Figura 18. A pesar de tratarse de una primera aproximación al módulo final del robot, nos ayudará a comprender el funcionamiento de este.

La imagen muestra un solo módulo, pero al colocarse uno sobre otro, con la activación de los actuadores conseguiremos el desplazamiento relativo entre módulos del que hemos hablado, logrando así el giro deseado del robot completo.

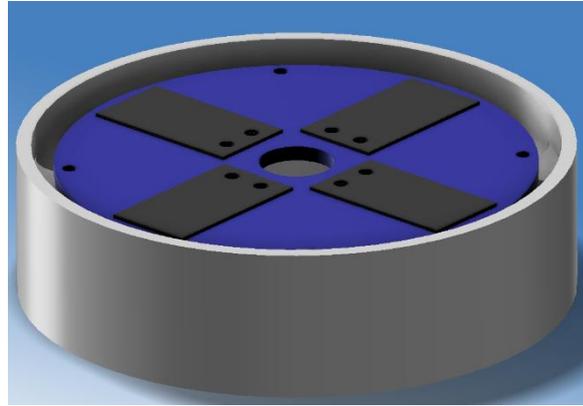


Figura 18: Diseño 3D, módulo con actuadores (Úbeda, R.)

### 3.4. ESTUDIO DEL MOVIMIENTO

Cada módulo dispondrá de cuatro actuadores dispuestos en forma de puntos cardinales, con el fin de cubrir todos los movimientos posibles del módulo. La adición de módulos será sencilla, pues cada uno de los módulos es exactamente idéntico al anterior, y bastará con colocarlo sobre el último y realizar el conexionado correspondiente.

Los actuadores y los ejes de cada módulo estarán dispuestos en las posiciones numeradas en la Figura 19.

Como sugiere el propio nombre del estudio, se trata de actuadores binarios, todo o nada, que al ser accionados se elevan por completo o están en reposo, no existirá una posición intermedia. Los actuadores se encontrarán equiespaciados en el módulo, y cada uno tendrá dos estados, activado y desactivado. Cuando se activa un actuador, elevará el módulo en la zona donde se encuentre ese actuador. Es decir, cuando un actuador está en la posición "ON", el módulo se inclinará cambiando la orientación, pues se elevará en el punto donde esté situado ese actuador.

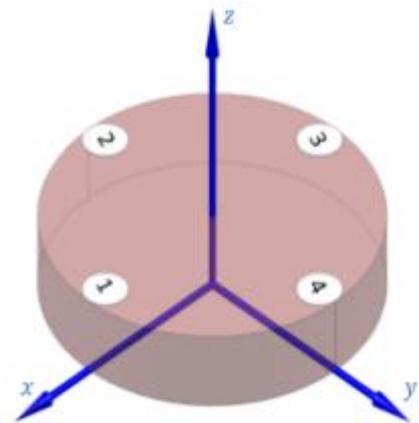


Figura 19: Actuadores (Hontiyuelo, 2018)

Nos interesa, además de cambiar la orientación o inclinar el robot hacia un lado, poder aumentar levemente la longitud del robot, haciendo que los cuatro

actuadores se activen simultáneamente. Esto provocará que cada módulo se separe del contiguo, aumentando la longitud total del robot temporalmente.

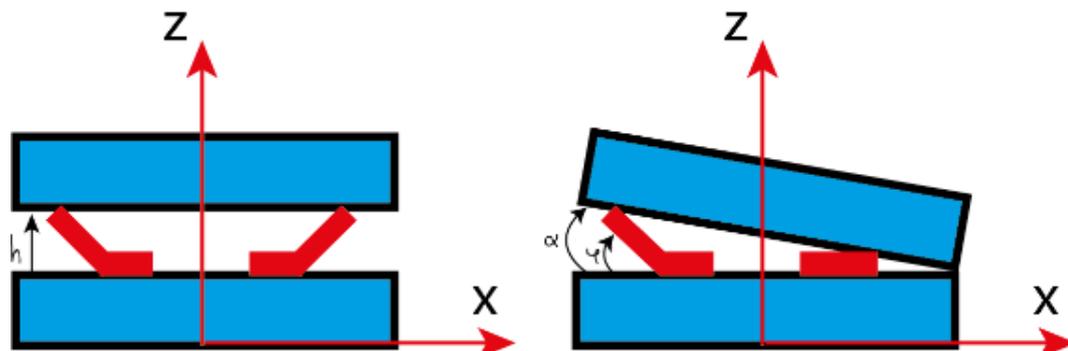


Figura 20: Izquierda - Elevación (Todos los actuadores activados);

Derecha - Giro (Dos actuadores activados) (Álvarez García, J. 2019)

Para ello, es interesante evaluar las configuraciones posibles de todos los actuadores, pues no todas las configuraciones son posibles. A continuación se detallan todos los casos que pueden llevarse a cabo.

- Todos los actuadores desactivados, los módulos descansan en reposo unos sobre otros.
- Dos actuadores próximos activados. Solamente es válido en caso de tratarse de actuadores contiguos, de esta manera conseguiríamos un giro del módulo, con un eje de rotación determinado. De esta forma conseguiríamos cuatro giros diferentes.
- Todos los actuadores activados, lo cual causaría un incremento de longitud total del robot, sin intervenir en el giro del mismo.

De estas normas se deduce que no debería existir la elevación de solamente un actuador, ni de tres actuadores, ni la activación de dos de ellos que no sean contiguos.

En la Figura 21 se estudian las distintas configuraciones, tanto las posibles como las prohibidas. Se incluye además el efecto que tendrán cada una de ellas en el movimiento del robot. Nos será de gran ayuda en el estudio del movimiento del robot, así como en el posterior diseño y programación del robot.

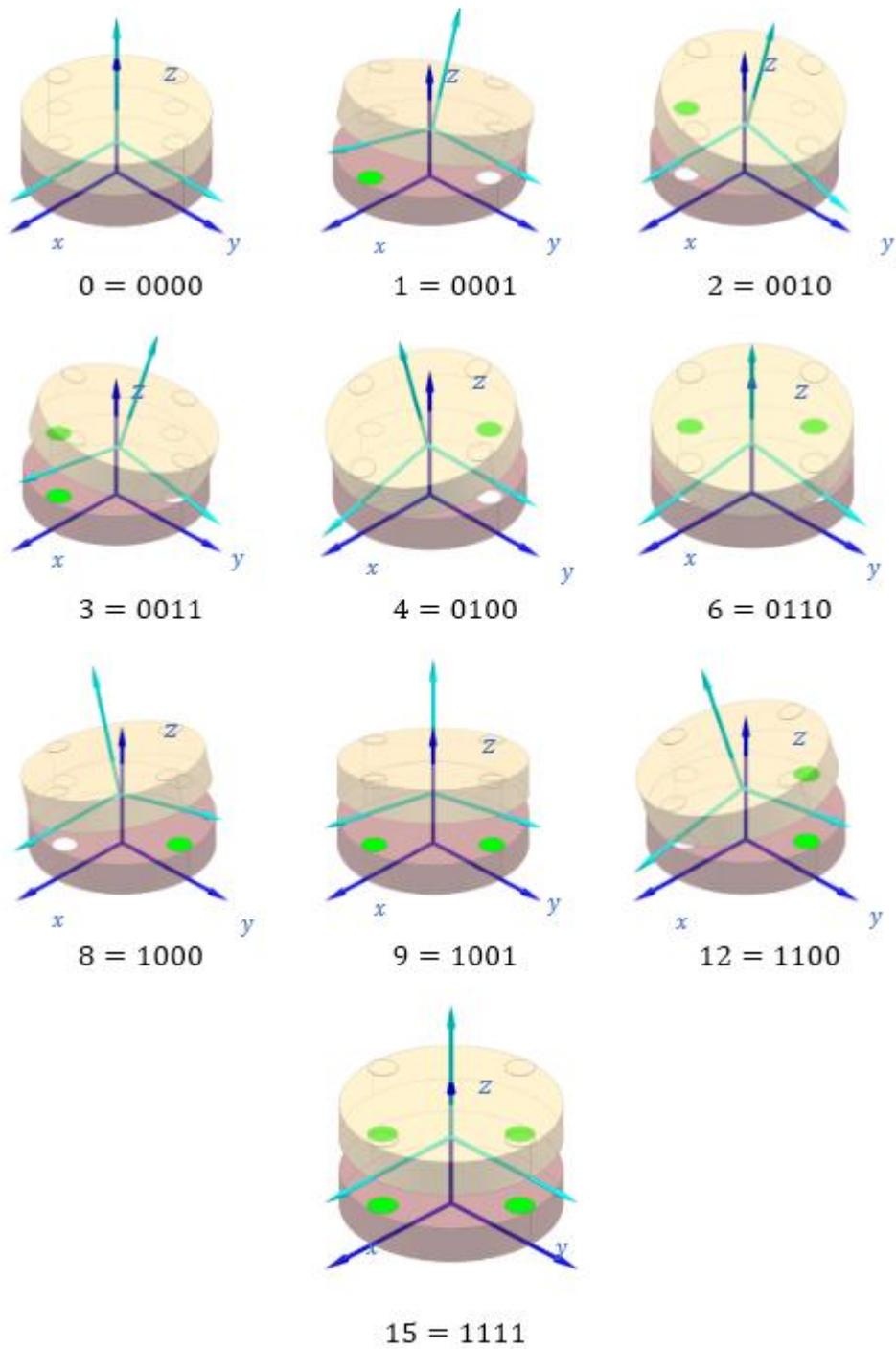


Figura 21: Configuraciones adoptadas por los módulos y estado de los actuadores correspondientes (verde=activado (1), blanco=desactivado (0)) (Hontiyuelo, 2018)



A continuación se muestra una tabla que muestra las configuraciones de los actuadores, mostrando como configuraciones “no viables” aquellas que impondrían la elevación de un solo elevador o la actuación de 3 de ellos y, por tanto, no estarían contempladas en nuestro robot.

Actuador 1	Actuador 2	Actuador 3	Actuador 4	Movimiento
0	0	0	0	Reposo
0	0	0	1	No viable
0	0	1	0	No viable
0	0	1	1	Caso 3
0	1	0	0	No viable
0	1	0	1	No viable
0	1	1	0	Caso 6
0	1	1	1	No viable
1	0	0	0	No viable
1	0	0	1	Caso 9
1	0	1	0	No viable
1	0	1	1	No viable
1	1	0	0	Caso 12
1	1	0	1	No viable
1	1	1	0	No viable
1	1	1	1	Incremento Longitud

Figura 22: Configuraciones de los actuadores

### 3.4.1. Grados de libertad entre módulos

Para simplificar el movimiento entre módulos, la activación de los actuadores se tratará como un desplazamiento entre los módulos o como un giro entre ellos con un determinado eje de rotación.

A continuación se muestran los grados de libertad entre módulos, es decir, sus coordenadas generalizadas. [Álvarez García, J. 2019]

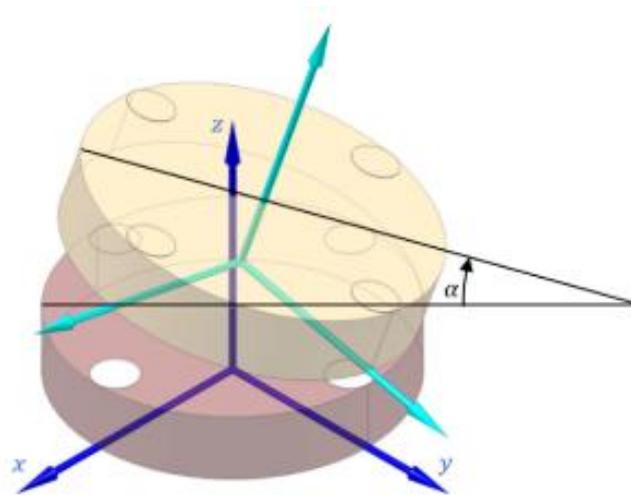


Figura 23: Grado de libertad  $\alpha$  (Hontiyuelo, 2018)

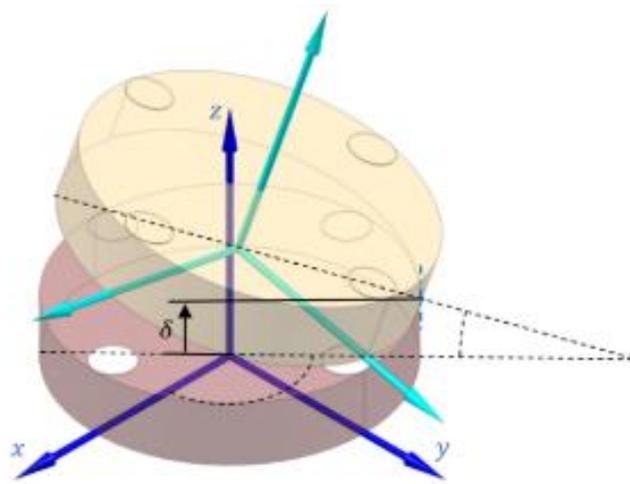


Figura 24: Grado de libertad  $\delta$  (Hontiyuelo, 2018)

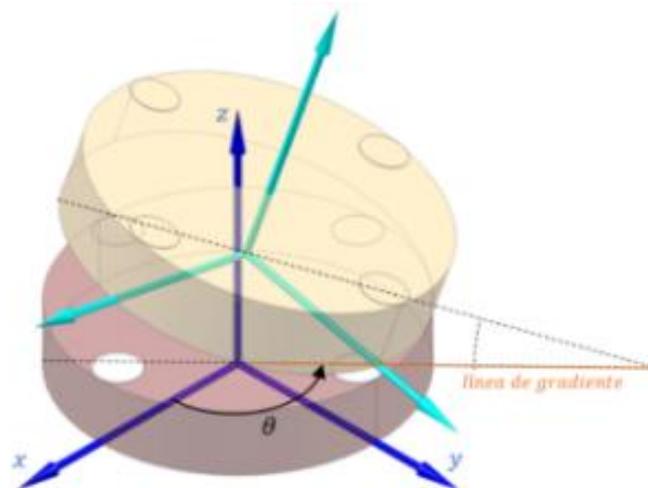


Figura 25: Grado de libertad  $\theta$  (Hontiyuelo, 2018)



### 3.4.2. Limitaciones en su aplicación

Estos estudios teóricos del movimiento del robot, se han expuesto bajo una serie de premisas que no serán tal en un funcionamiento real. Por un lado, los cálculos se han desarrollado sin tener en cuenta la fuerza que tienen que efectuar los actuadores, suponiendo que todos ellos alcanzarán la altura que estipulemos sin importar las fuerzas, ni de gravedad ni de los propios módulos.

Por otro lado, los actuadores situados en los módulos inferiores, tendrán que realizar mas fuerza, y por ello probablemente se elevarán menos, que los que estén situados en la parte superior. Esto se deberá, por ejemplo, al propio peso del robot, o a la inclinación que esté ejerciendo, ya que el centro de masas se desplazará con el movimiento.

En definitiva, a pesar de no ser completamente precisas, las consideraciones adaptadas serán de gran utilidad para la construcción del robot y su programación, ya que nos permiten conocer qué actuadores deben o no activarse según la configuración que deseemos que adopten los módulos del robot.





# Capítulo 4. Mecanismos de actuación





#### 4.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha tratado el diseño del robot, por lo que ya conocemos los movimientos que debe realizar. Por tanto, en el presente capítulo abordaremos cuál es la mejor forma de ejecutarlo, valorando las opciones disponibles en el mercado. Se escogerán una o varias posibilidades y realizaremos un estudio posterior más detallado de ellas.

#### 4.2. ALTERNATIVAS DE ACTUACIÓN

Conociendo la naturaleza del movimiento de nuestro robot, se establecerán una serie de alternativas a los IPMCs para los cuales se desarrolló el modelo mencionado anteriormente. Para ello, analizaremos algunas opciones de micro actuadores que nos encontramos en el mercado.

En el proceso de investigación, partimos de un exhaustivo análisis de tecnologías y materiales para el diseño de un robot ápedo, modular e hiper-redundante [Madruga, S. 2015].

##### 4.2.1. Polímeros Electro-Activos

Los polímeros electroactivos (EAP – Electro active polymers) son materiales que reaccionan ante algunos estímulos eléctricos. Esto hace que sean especialmente útiles para la composición de actuadores. Existen de diversas naturalezas y, por ende, de distintas respuestas, que variarán según el estímulo recibido. [Garzón, 2011].

La biocompatibilidad será esencial para el proyecto que nos ocupa, lo cual no será ningún problema, ya que algunos EAPs son perfectamente biocompatibles. Otro factor importante a tener en cuenta es la posibilidad de miniaturización, necesaria para la fabricación del robot final. Pueden tener múltiples aplicaciones, como por ejemplo, sensorización. [El-Hag, 2006].

Son ampliamente utilizados como actuadores en micro robots, especialmente en aquellos que imitan un ser biológico, ya que se comportan de una forma muy similar a la musculatura. [Mutlu, 2013]

En algunas fuentes bibliográficas, se indicaba que la utilización de EAPs era una de las mejores opciones, teniendo en cuenta su biocompatibilidad y sus características. No obstante, es un material complejo, no muy extendido, y por ello tiene un coste económico muy elevado. De hecho, existe poca documentación al respecto y sería de gran dificultad técnica aplicarlo a un prototipo de ensayo como será nuestro caso.

#### 4.2.2. Actuador electromagnético

Los actuadores electromagnéticos deben valorarse como una posible opción, ya que han evolucionado hasta nuestros días miniaturizándose hasta lograr tener únicamente unos pocos milímetros de lado. A continuación comentaremos dos tipos que, a priori, podrían sernos de utilidad.

##### 4.2.2.1. Actuador lineal

Se trata de un actuador que generará un desplazamiento lineal de un émbolo. Esto se logra gracias a la generación de un campo magnético en una bobina mediante la circulación de corriente eléctrica por la misma. Este campo magnético tratará de atraer el núcleo ferromagnético del émbolo, provocando así su desplazamiento.



Figura 26: Actuador lineal

Con este tipo de actuador bastaría con diseñar un mecanismo de actuación que impulsase el módulo con el émbolo de manera que, con los cuatro actuadores opuestos dos a dos, se podrían ejecutar los movimientos de elevación deseados.

El principal problema lo encontraremos tanto en el tamaño como en la capacidad de actuación, ya que debe tener al menos la longitud del pistón que se desplaza, que no supera unos pocos milímetros. Esto, de cara a una futura miniaturización del prototipo, no lo hace viable.

##### 4.2.2.2. Actuador tipo bisagra

Consta de una bobina unida a uno de los lados de la bisagra, por la cual se hace pasar una corriente. En el centro de la bobina y anclado a la otra hoja de la bisagra se encuentra un imán.

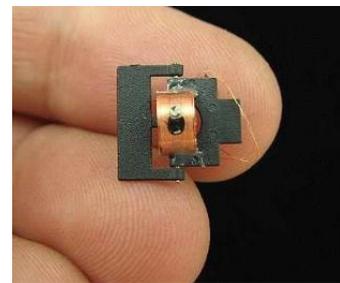


Figura 27: Actuador utilizado en aeromodelismo

Al circular la corriente por la bobina, se generará un campo magnético, que tratará de posicionar el imán. Esto provocará un movimiento en forma de bisagra entre las dos partes del actuador. Es un efecto interesante muy empleado en aeromodelismo, ya que colocando cuatro, con una simple elevación de cada una de las cuatro bisagras, podríamos lograr el lado del robot que deseamos.

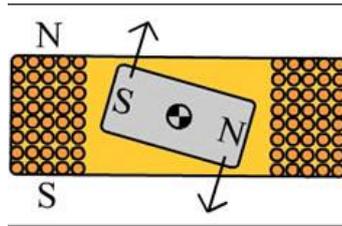


Figura 28: Funcionamiento del imán y la bobina

No obstante, la fuerza de actuación dependerá del tamaño de la bobina y el imán, por tanto, si se trata de reducir lo máximo posible el tamaño, apenas podría elevar una masa de un gramo. Por ello, se descartará desde un punto de vista práctico.

### 4.2.3. Micromotores

La utilización de motores en los actuadores tiene la ventaja de poder controlar fácilmente el grado de actuación de estos, por lo que podríamos disponer de actuadores que no fuesen binarios, sino que podría variarse el grado de giro de una forma continua y no solo discreta.

#### 4.2.3.1. Paso a paso

Los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos que pueden controlar el ángulo de giro que realizan. Esto se logra gracias a impulsos eléctricos, que desplazan el eje un determinado grado con cada impulso.



Figura 29: Motor paso a paso

La principal ventaja de este tipo de motor es el fácil control de la posición del actuador, pues controlando el número de pasos podemos controlar y calcular la elevación de los actuadores, y con ello el ladeo del robot.

El problema encontrado con este tipo de motores es que, en el tamaño que deseamos, el par que desarrollan es demasiado bajo, por lo que no sería capaz de vencer un peso mínimo, mucho menos del robot completo.

#### 4.2.3.2. Motor de continua DC

El motor de corriente continua produce un movimiento rotatorio, provocado por un campo magnético.

El posicionamiento no es tan controlable como en el motor paso a paso, pero por otro lado podemos controlar la velocidad de giro del rotor variando la tensión continua que recibe. Esto es fácilmente configurable con un microcontrolador, variando la tensión con un control PWM.

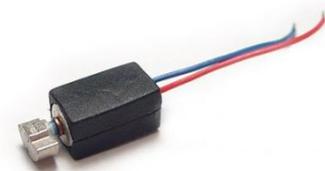


Figura 30: Micro motor DC utilizado

Actualmente podemos encontrar motores DC de un tamaño muy reducido, aproximadamente de las mismas dimensiones que el paso a paso mencionado anteriormente, por lo que es una opción que debemos valorar en nuestro estudio. No obstante, tal y como en el caso anterior, en los tamaños que se requieren el par máximo que ejercen es realmente pequeño.

#### 4.2.4. Nitinol

El Nitinol pertenece al grupo de los SMA (Shape Memory Alloys) y es una aleación biocompatible de Níquel y Titanio, cuyo nombre es un acrónimo que nos habla de sus componentes, así del lugar donde se descubrió. Se forma por las palabras en inglés: *Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory*. Tras un descubrimiento accidental, se comprobó que la propiedad que mejor define este material es el cambio de la estructura de la aleación dependiendo a la temperatura a la que se encuentre.

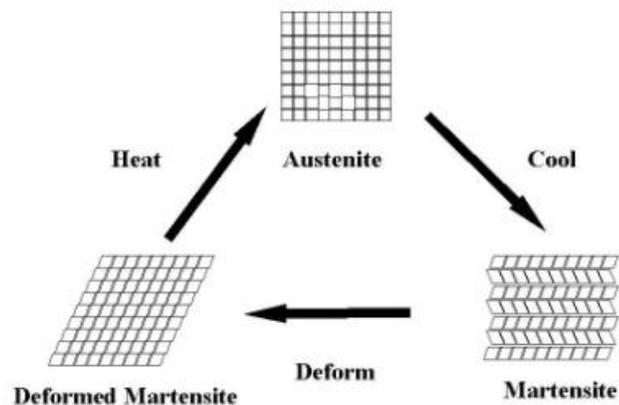


Figura 31: Diagrama de transformación del Nitinol

No obstante, esta no es la única propiedad inherente a este material, aunque las dos propiedades que más interesan a nuestro cometido están relacionadas en cierto modo. Estas son la superelasticidad y la memoria de forma. La memoria de forma permite devolver al Nitinol la configuración que tuviese inicialmente, a través de aplicar temperatura al material. La superelasticidad es un fenómeno que ocurre en un intervalo concreto de temperaturas, y permite al material ser mucho más flexible de lo que es prácticamente cualquier metal, alrededor de 20 o 30 veces más elástico.

El Nitinol se ha investigado ampliamente en anteriores proyectos, y, a priori, su memoria de forma le permite contraerse alrededor de un 3% de su tamaño original, por lo que podría utilizarse para desplazar una masa y formar parte del mecanismo de actuación de nuestro robot. Bastaría con aplicarle una cierta tensión para que circule una intensidad por el cable, al calentarse este se contraería. En una utilización ideal, debería refrigerarse posteriormente para que el actuador volviese a su posición inicial, pero también podría implementarse algún elemento de recuperación elástico.

### 4.3. DISEÑO DEL ACTUADOR

Nos encontramos en la necesidad de diseñar e incorporar un mecanismo que pueda realizar, con la suficiente potencia, la función de los actuadores que se han descrito en el diseño de los módulos. Es decir, deberá ser un dispositivo mecánico que posibilite un desplazamiento de cada uno de los módulos superiores hacia arriba.

### 4.4. FORMAS DE ACTUACIÓN

#### 4.4.1. Antecedentes

Partimos de la documentación más reciente sobre ello, aplicando el modelo de una palanca simple que se elevará mediante tracción. A continuación evaluaremos las opciones propuestas hasta la fecha. [Hernández, S. 2018], [Úbeda, R. 2018].

El actuador propuesto se trata de una palanca, la cual al elevarse de uno de sus extremos empujará el módulo superior en ese punto. Para lograr esa elevación disponemos de dos opciones. Por un lado, en el caso de emplear un motor, se traccionaría un cable desde el punto de apoyo a modo de cabrestante. Mientras que, por otro lado, en el caso de utilizar Nitinol en lugar del cable, al contraerse provocará una tensión que hará elevarse el extremo de la palanca, tal y como se muestra en la Figura 32.

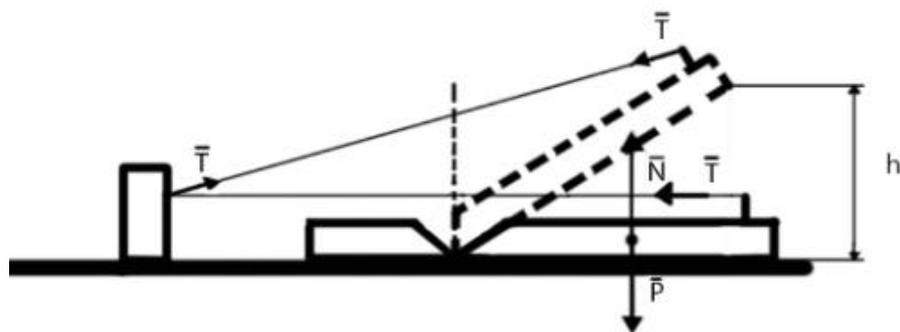


Figura 32: Actuador propuesto por Hernández, S en 2018

T: Fuerza de Tensión del Flexinol

N: Normal

P: Peso del actuador

H: Altura efectiva

#### 4.4.2. Mecanismos alternativos

Dentro de este mecanismo de palanca simple que hemos mostrado, vamos a estudiar dos opciones distintas que se desarrollan a continuación.

##### 4.4.2.1. Actuador flexible

El actuador flexible consistiría en una lámina flexible, que estaría anclada en las aberturas que se observan en la imagen. Traccionar del cable, hará que la lámina se flexione y por ende se eleve del módulo. Al elevarse, el actuador empujaría al módulo superior, provocando su desplazamiento.

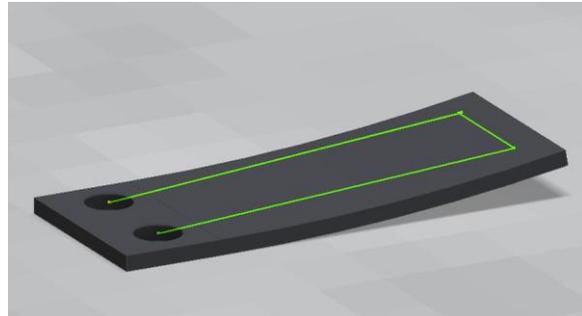


Figura 33: Actuador Flexible

Como se ha comentado, se requerirían cuatro actuadores, para cubrir todos los posibles desplazamientos.

La desventaja de emplear este tipo de actuador es que la flexión del material flexible no es controlable, actuaría simplemente en la zona más débil mecánicamente, sin ser ese el punto que nos interesa. Es por eso que, a continuación, se planteará el uso de una palanca rígida, conociendo el punto de flexión y longitud total de la palanca.

##### 4.4.2.2. Palanca rígida

El mecanismo de actuación es muy similar al del apartado anterior. Se basa en una lámina rígida, con un punto de menor sección próximo al anclaje que actúe de bisagra. Este se flexionará al traccionar o contraer el cable, consiguiendo así la elevación del punto contrario al punto de unión del actuador con el módulo.

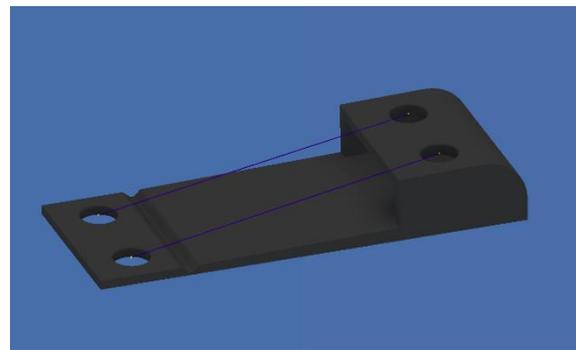


Figura 34: Palanca rígida

#### 4.5. PRUEBAS Y SELECCIÓN

Para las pruebas se han seleccionado tres actuadores distintos, con los que se comprobará cuál es óptimo para la construcción del prototipo. Realizaremos estas comprobaciones con ambos motores, el motor paso a paso y el DC, y el Nitinol. Como se ha comentado anteriormente, los polímeros electroactivos y



los actuadores electromagnéticos han sido descartados, o bien por coste de adquisición, por complejidad, o por no cumplir con las expectativas iniciales.

Se adaptará el modelo de palanca rígida a cada uno de los mecanismos de actuación, actuando como cabrestante en el caso de los motores y a través de su memoria de forma en el Nitinol.

#### **4.5.1. Construcción del Actuador**

Se ha optado por construir una pieza para la realización de las pruebas correspondientes, a partir del modelo mostrado en la Figura 34 se fabricará mediante una impresora 3D.

Se han probado distintos materiales, tales como Nylon, PLA y ABS, siendo el ABS el material que mejores resultados nos ha ofrecido. Posee algo de elasticidad, por lo que la flexión de la palanca -que se realiza en el punto de menor sección- tendrá más resistencia a la fractura que la pieza impresa en PLA.

No obstante, los detalles constructivos y la impresión 3D de las piezas se explicará con más detenimiento en el capítulo “Construcción del Prototipo”.

#### **4.5.2. Motores**

Cabe destacar que en estos tamaños de motor, las corrientes consumidas no exceden en ningún caso la corriente recomendada para los pines del Arduino, por lo que no necesitaremos incluir ningún driver que aumente el tamaño final.

##### **4.5.2.1. Motor paso a paso**

Vamos a realizar un programa sencillo en Arduino, con el fin de probar las características de los micro motores paso a paso de los que disponemos. Hemos comprobado que puede controlarse fácilmente el número de vueltas y, por tanto, la velocidad de giro del eje.

Sin embargo, una vez instalado y listo para hacer la prueba de elevación, hemos comprobado que no disponen del par necesario para la movilización del actuador. Pasamos a realizar la prueba del motor de continua. Puede observarse la prueba en la Figura 35.

##### **4.5.2.2. Motor DC**

Ahora hemos realizado la prueba para el motor de continua. Hemos comprobado lo sencillo que resulta controlar la velocidad del motor, a través de un control PWM. No obstante, aunque trata de girar y mantiene ligeramente levantada la palanca como se observa en la Figura 35, soporta un peso muy

reducido en ella, por lo que tampoco puede vencer el par demandado para poder mover el robot.

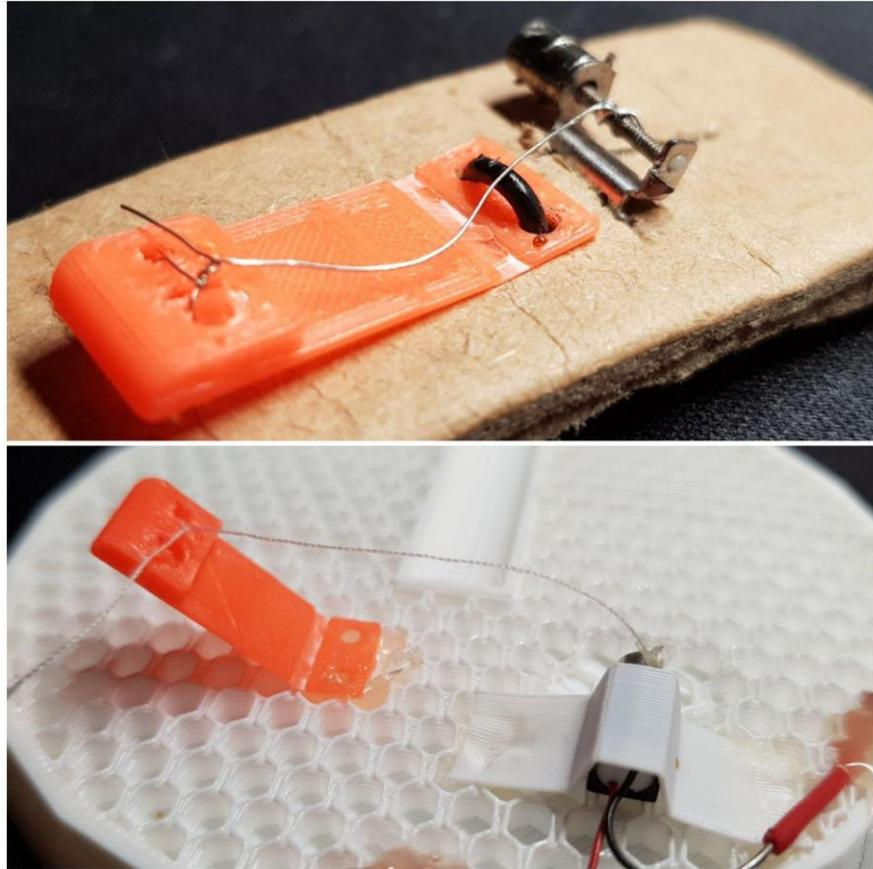


Figura 35: Pruebas de actuación con motores

### 4.5.3. Flexinol

A continuación comprobaremos la capacidad de contracción y carga del Nitinol. Se ha aplicado en un cable estirado una corriente de unos 200mA aproximadamente, tal y como recomienda el fabricante. Hemos comprobado tal y como se muestra en la Figura 36, que la contracción es del 3 al 4%, y la fuerza ejercida es mucho mayor que en el caso de los motores, aunque el control sea algo más complicado.

Tras las pruebas, tal y como sugerían los trabajos anteriores ya mencionados, el Flexinol parece ser el material que conformará parte de nuestro actuador, aunque surge la complejidad de elevar el actuador con tan poca variación de longitud.

En el siguiente apartado trataremos de solucionar este detalle y aplicarlo a nuestro caso.

#### 4.6. ENSAYOS REALIZADOS CON FLEXINOL

En el presente apartado ahondaremos más en cómo será empleado el Nitinol para lograr que sea lo más efectivo posible y cumpla con las necesidades del proyecto. Una vez conocidas sus características más relevantes, se tratará de aplicar dichas propiedades a un modelo real, observando su comportamiento en un actuador aislado.

##### 4.6.1. Estudios previos

Los actuadores deben elevarse por acción del Nitinol, gracias a la capacidad de este de contraerse con la aplicación de una elevada temperatura. No obstante, como comentábamos anteriormente, la capacidad de retracción del material es escasa, aproximadamente un 3% de su longitud total. Esto, se comprobó en ensayos realizados con anterioridad, tal y como muestra la Figura 36.

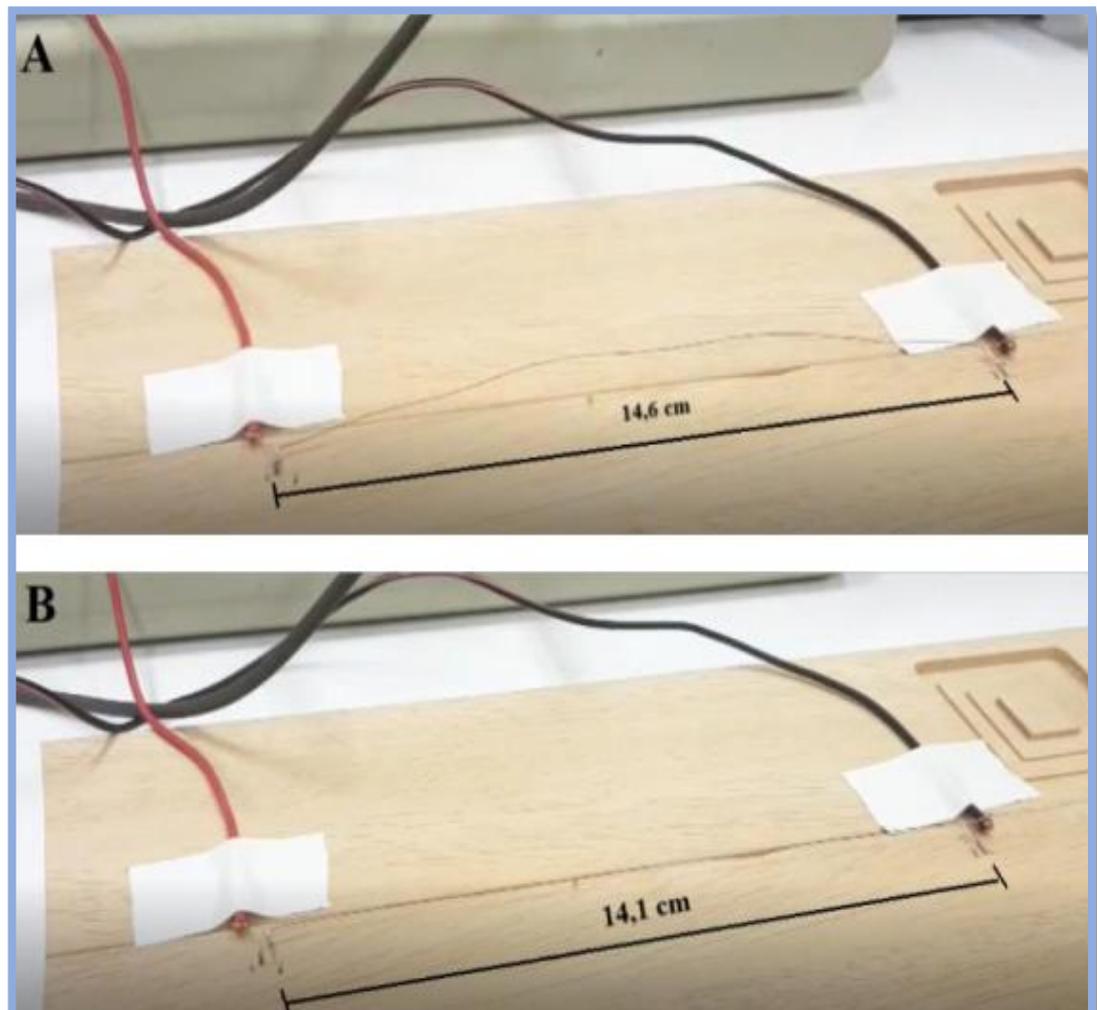


Figura 36: Contracción del Nitinol, (Hernández, S 2018)

En dichos estudios anteriores, los ensayos realizados sí lograban elevar el actuador una altura de 7mm con una carga de 15 gramos como observamos en la Figura 37. Sin embargo, aunque en este experimento si se consiguió elevar el actuador, en nuestras pruebas posteriores no. El motivo es la longitud del cable de Flexinol.

En la prueba que comentamos, que se realizó en otro proyecto con anterioridad, podemos observar que se realizó la activación con un cable de 150mm de longitud.

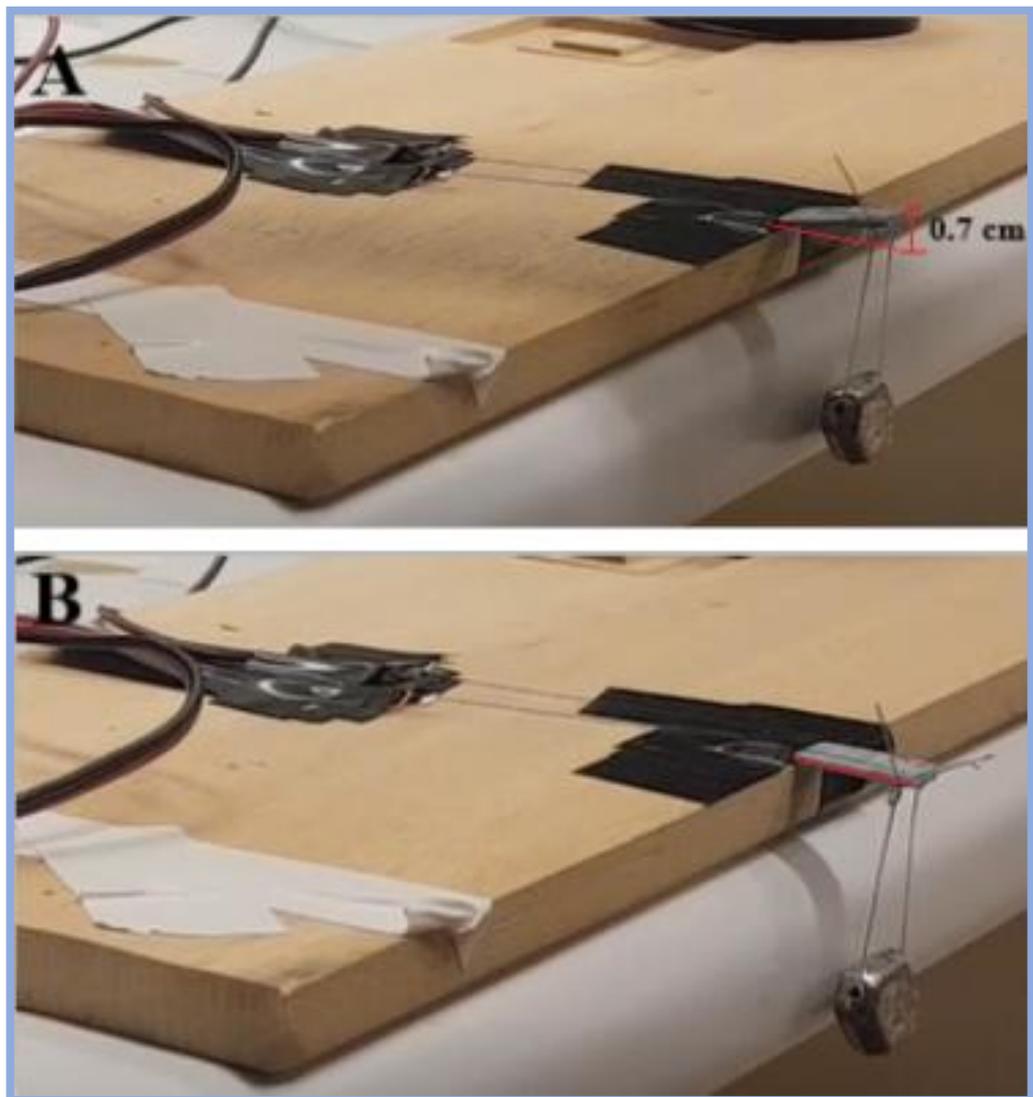


Figura 37: Elevación del actuador (Hernández, S. 2018)

Sin embargo, este comportamiento no sería tal en el actuador dispuesto en nuestro prototipo ya que, en nuestro caso, el fragmento de cable será únicamente de 35mm, pues la longitud y diseño del actuador no nos permite

emplear más cable. Por ende, como la contracción es un 3% de la longitud total, realizando la misma prueba con un cable de 35mm, la elevación del actuador será de apenas 1mm en lugar de los 7mm de la prueba anterior.

Esa elevación es insuficiente para el propósito de nuestro prototipo. De hecho, el actuador debe diseñarse de forma que permita miniaturizarse mucho más, por lo que reduciendo más el tamaño reduciríamos aún más la elevación del actuador, y con ello el movimiento de nuestro robot.

Esta situación, llevó prácticamente a desestimar la utilización del Nitinol, pues no cumplía las necesidades del proyecto. Tras la investigación cuidadosa de todas sus propiedades y la realización de varias pruebas, observamos que reconfigurando la forma memorizada del Nitinol, no tendríamos solamente ese 3% de contracción, sino que podríamos devolverlo a una forma previamente definida con mucha más capacidad de actuación.

#### 4.6.2. Actuadores con memoria de forma (SMA)

Este material posee una característica que denominamos memoria de forma. Esta característica permite deformar el Nitinol y recuperar su forma inicial con tan solo aplicarle calor. Con esta premisa, no solo podríamos contraer el material, sino, recuperar una forma previamente adquirida aplicando corriente, y con ello calor, al cable.

##### 4.6.2.1. Reconfiguración de forma

Para poder reconfigurar la forma inicial, el proceso es sencillo. Bastará con fijar el Nitinol en la forma que deseemos, para después someterlo a elevadas temperaturas (400-550 °C) durante unos minutos. El tiempo requerido dependerá del grosor del cable, repercutiendo después en las capacidades de recuperación. En nuestro caso, bastará con unos 20 segundos.

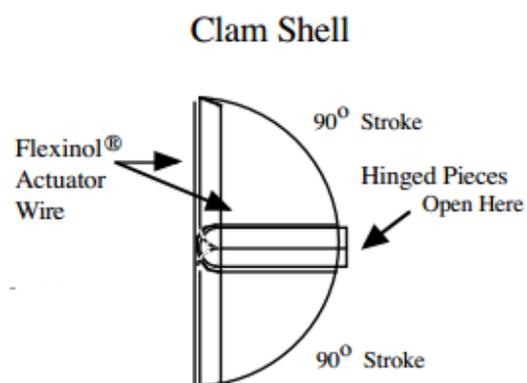


Figura 38: Actuación del cable tipo bisagra

##### 4.6.2.2. Forma deseada

Podemos dar al Flexinol la forma que deseemos, siempre y cuando se fije correctamente antes de proceder al calentamiento. En la documentación del fabricante, se detalla el porcentaje de contracción dependiendo de la forma que se adopte, y el peso que soportará cada una de estas configuraciones.

Si el cable adopta la forma de una bisagra, la contracción -sin carga- será del 100%, el cable se doblaría en su punto medio y los extremos llegarían a juntarse, sin embargo el actuador no vencería prácticamente ningún peso.

Por el contrario, si la forma otorgada es el cable estirado, y solo contrae el 3% comentado anteriormente, el peso vencido será el máximo, pero la distancia conseguida será mínima. Esta configuración puede observarse en la Figura 39.

### Normal Bias Spring

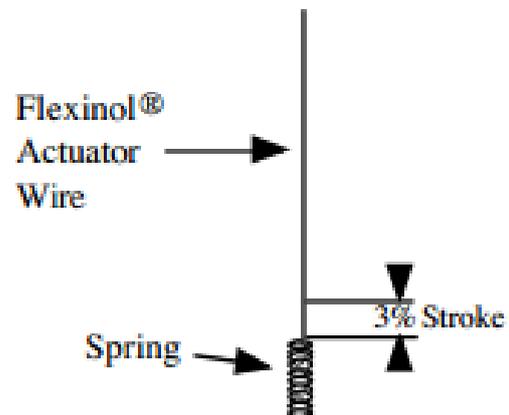


Figura 39: Actuación del cable recto

En búsqueda del compromiso entre la distancia de actuación y el peso soportado, la forma óptima sería la utilización de una palanca simple, provocando que el pequeño desplazamiento de la contracción se correspondiese en un gran desplazamiento del actuador. Esta configuración no es viable por el diseño de nuestro actuador, por lo que la forma que consideramos más adecuada para contraer medias distancias desplazando pesos medios, es la forma de un muelle.

Para ello, daremos vueltas al Nitinol alrededor de un clavo, y aplicaremos calor con un soplete durante el tiempo definido. Trascurrido ese tiempo, y una vez frío el Nitinol, podemos desdoblar todo el cable, dejándolo completamente liso y estirado. Ese fragmento de cable ya tendrá la forma definida de muelle, por ello, cuando le apliquemos calor, rápidamente tenderá a recuperar la forma del muelle, pudiendo contraerse, sin peso, más de un 80% de longitud total.

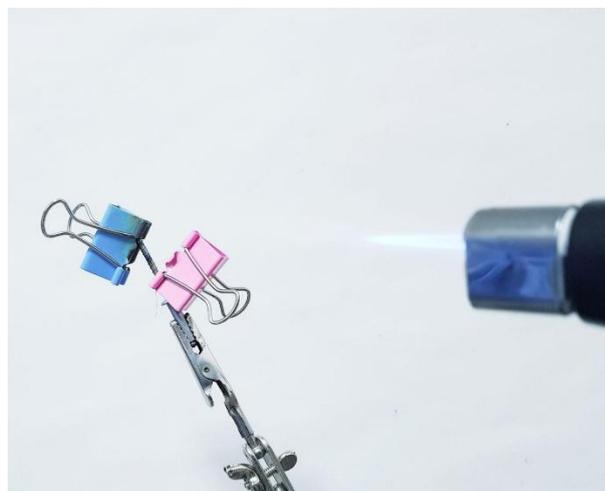
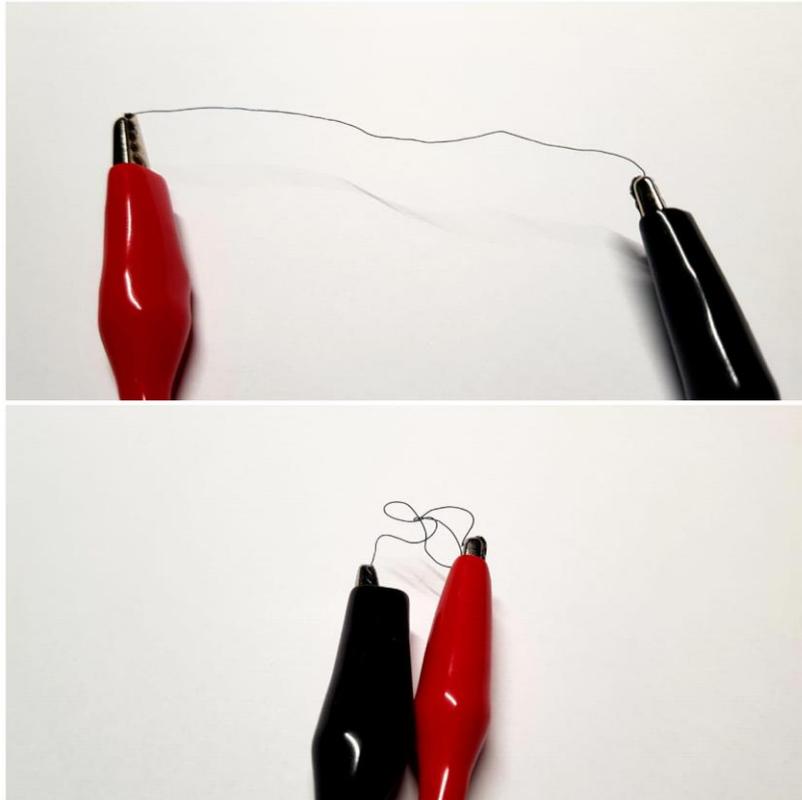


Figura 40: Memorización de forma del Nitinol

Podemos comparar las Figura 37 y la Figura 41 y ver cómo el Nitinol se retrae mucho más ahora que en experimentos previos, todo ello gracias a haber memorizado una nueva forma del material.



*Figura 41: Retracción del Nitinol previamente memorizada la forma de rizo*

#### 4.6.3. Variables – Diámetro del cable

Disponemos de una larga lista de diámetros de cable de Nitinol distintos, pero se han seleccionado tres para poder comprobarlos y decidir cuál es el más recomendable para el propósito que nos ocupa. En nuestro caso utilizaremos Flexinol, que es el Nitinol que ofrece el fabricante Dynalloy.

Los tres diámetros de los que disponemos son 0.25mm, 0.15mm y 0.1mm.

A continuación se incluye una tabla con las características eléctricas y mecánicas del Flexinol en sus distintos diámetros.



Propiedades		100 HT	150 HT	200 HT
Físicas	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	100	150	200
Eléctricas	Resistencia (ohmios/metro)	150	50	31
	Intensidad recomendada (mA)	180	400	610
Fuerza	Fuerza recuperación (g)	5	15	30
Velocidad	Contracción típica (s)	1	1	1
Térmicas	Inicio activación ( $^{\circ}\text{C}$ )	60		
	Final activación ( $^{\circ}\text{C}$ )	70		
	Inicio reposo ( $^{\circ}\text{C}$ )	52		
	Final reposo ( $^{\circ}\text{C}$ )	42		
	Redefinir forma ( $^{\circ}\text{C}$ )	300		

Figura 42: Tabla de características del Flexinol

Como podemos observar en la relación del diámetro con las características del cable, será necesario escogerlo adecuadamente. Trataremos una a una sus propiedades para decidirnos.

En primer lugar, observamos que en el cable de 0.2mm, necesitaremos una corriente muy elevada para su correcto funcionamiento (más de 600mA), por lo que, tal y como tenemos dimensionado nuestro prototipo, es imposible manejar.

Además, la resistencia del cable está indicada en Ohmios por metro, y podemos observar que a mayor sección menos resistencia, pues la intensidad tiene menos dificultad para circular. Esto quiere decir que si nuestro actuador tiene un cable de unos pocos milímetros, la resistencia será todavía menor.

Por todo ello, y a pesar de que es el cable que más fuerza ejerce, debemos descartar el Flexinol de 0,2mm por cuestiones eléctricas.

Para decidir si el diámetro más adecuado es el de 0.1mm o 0.15mm, nos fijaremos en las propiedades mecánicas de ambos. Como vemos, el cable de 0.1mm de diámetro únicamente puede vencer unos pocos gramos, por ello, nos decantaremos por el cable de 0.15mm.

Realizando pruebas con ambos cables, hemos comprobado que con la corriente que podemos suministrar, el cable de 0.15 sin carga tiene menos retracción y más lenta que el de 0.1, sin embargo, al añadir una carga mínima, el fragmento de Flexinol de 0.1 no ha podido vencerla y el de 0.15 sí.



#### 4.6.4. Ensayo de temperatura del Flexinol

Conocemos la temperatura a la que debe trabajar el Nitinol, por ello, realizaremos una serie de mediciones de temperatura en el cable a distintas intensidades, comprobando no sobrepasar el límite de temperatura deseable en el funcionamiento.

La temperatura del cable es un factor que debemos controlar por dos motivos. En primer lugar, no sobrepasar la temperatura indicada por el fabricante nos ayudará a mantener íntegras las propiedades de este. En segundo lugar, los actuadores están impresos en 3D en un material plástico (ABS), que aunque aguanta relativamente bien las altas temperaturas puede deformarse e incluso quedar inservible como nos ha ocurrido en algunas pruebas.

Para la realización de estas pruebas, contamos con un instrumento de uso profesional, una cámara termográfica FLIR, con la que realizaremos las pruebas y algunas capturas que comprueben las temperaturas alcanzadas.

Aprovecharemos la disponibilidad de la cámara para comprobar la temperatura de los transistores, ya que como mencionaremos en el apartado correspondiente, los transistores seleccionados trabajan en su límite de intensidad, provocando grandes incrementos de temperatura en los transistores, debilitando así sus características. Esto nos servirá para ajustar el ancho de pulso para que los transistores no lleguen a alcanzar la temperatura crítica que menciona su hoja de características.

En la Figura 43 puede observarse que el actuador alcanza los 67.2 °C con la corriente suministrada. En la tabla anterior se indicaba que la temperatura de funcionamiento del cable debe ser entre 60 y 70 °C, y a esa temperatura tampoco llega a dañarse el ABS, por lo que la temperatura medida es perfecta.

Observamos también que la temperatura del transistor no llega a alcanzar esa temperatura crítica que mencionábamos anteriormente, sin embargo, en el montaje final del prototipo veremos problemas de temperatura y de posible fallo en los transistores si se mantienen en estado activo durante mucho tiempo.



Figura 43: Temperatura alcanzada por el Nitinol



# Capítulo 5. Comunicaciones y Control. Esquema electrónico



## 5.1. COMUNICACIÓN

### 5.1.1. Introducción

En este capítulo trataremos la arquitectura que forma nuestro robot ápodico modular e hiper redundante. Se darán las nociones necesarias para la comprensión del esquema utilizado y el modo de control y comunicación entre los distintos niveles del robot. Valoraremos las distintas opciones y protocolos que están a nuestro alcance, optando por el que consideremos más adecuado para los requerimientos de nuestro proyecto.

Debemos comunicarnos con cada uno de los actuadores de los módulos de nuestro robot. Conforme añadimos módulos, el número de actuadores crece también. Por ello, debemos tener en cuenta que protocolo de comunicación emplear, ya que si enviásemos una señal a cada actuador en un canal exclusivo para la misma, necesitaríamos tantos canales como actuadores. Esto, en nuestro proyecto, sería inviable, ya que no tendríamos salidas suficientes para poder controlar todos los actuadores, y además obligaría a modificar el hardware en el caso de querer añadir más módulos.

Por tanto, no emplearemos una comunicación en paralelo sino una comunicación serial, centrándonos en evaluar las características de los estándares SPI e  $I^2C$ .

## 5.2. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA

Como se ha comentado anteriormente, se barajan dos configuraciones, una con un PC y su consola como interfaz de comunicación con el usuario y otra con un joystick dispuesto a tal efecto.

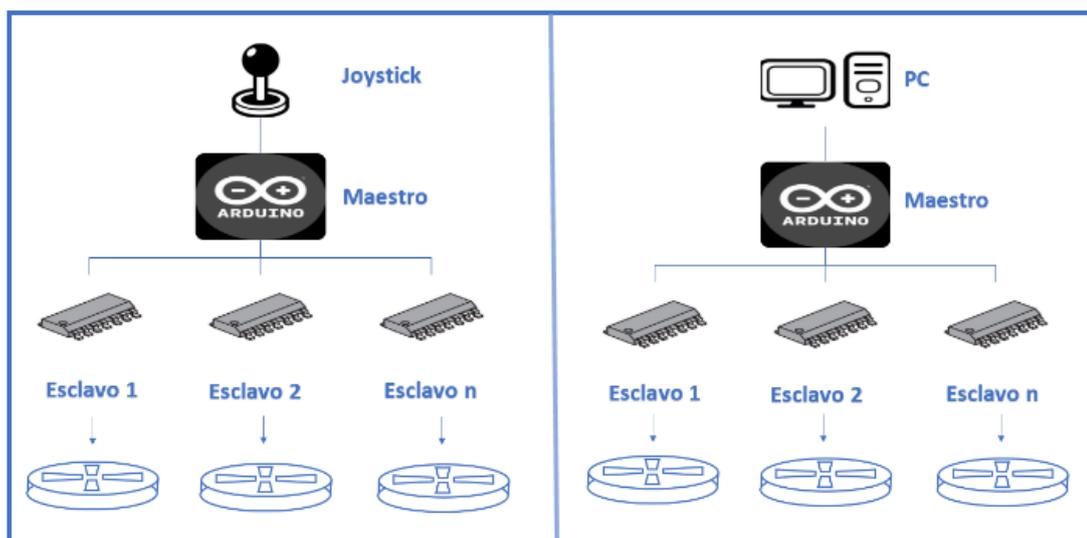


Figura 44: Esquema de Comunicación

### 5.2.1. Inter Integrated Circuit - $I^2C$

El estándar  $I^2C$  se denomina también TWI (Two Wired Interface) y, como su propio nombre indica, solo requiere dos cables para realizar la comunicación. Por un lado enviaríamos la señal de reloj (SCL) y por el otro los datos (SDA). Es un protocolo síncrono desarrollado por Phillips en 1982.

Algunas de sus características generales son:

- Comunicación síncrona, controlada por una señal de reloj común
- Velocidad de transmisión entre 100Kbits/s y 3.4Mbits/s.
- Distancia de transmisión de entre 2 y 3 metros.

La arquitectura que tiene es maestro-esclavo, siendo el maestro el que inicia la comunicación y solicita o envía los datos a los esclavos. Es decir, los esclavos no podrían iniciar la comunicación por su cuenta, ni con el maestro ni con ningún otro esclavo. La línea por la que el maestro y el esclavo enviarán y recibirán datos se denominará SDA (serial Data), mientras que la línea que llevará la señal de reloj será la SCL (Serial Clock).

$I^2C$  es un protocolo de comunicación en serie, por lo que los datos se transfieren poco a poco a lo largo de un solo cable (la línea SDA), al que estarían conectados todos los esclavos, cada uno de ellos con una dirección propia y diferente a las demás.

Dependiendo del dispositivo esta dirección viene implementada por hardware o, como en nuestro caso, se programa por software pudiendo ser la que se desee.

En el esquema de la Figura 44, se muestran unas resistencias pull-up que no incluiremos en nuestro prototipo, pues se aprovecharán las que están incluidas en el arduino. Aunque su valor es pequeño, serán suficiente para las velocidades de comunicación que necesitamos.

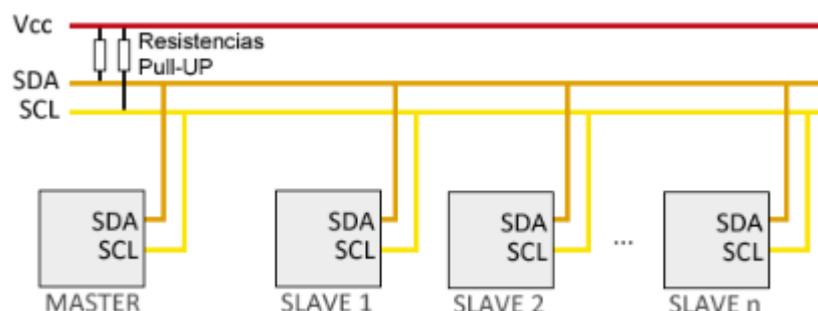


Figura 45: Comunicación  $I^2C$  en Arduino (Llamas, L.)

Para su utilización en Arduino disponemos de unos pines físicos que actúan de soporte  $I^2C$ , y están indicados en la propia placa como SDA y SCK. Se hablará de su programación en Arduino más adelante, pero se realizará con la librería “Wire.h”, que dispone de todas las funciones necesarias ya incorporadas.

En conclusión, es un protocolo sencillo de implementar, que puede ser utilizado para comunicaciones donde el tiempo no sea un factor crítico, y donde además se requiera utilizar el menor número de cables posibles. Por ello es un excelente candidato para nuestro proyecto.

### 5.2.2. Serial Peripheral Interface - SPI

El bus SPI se desarrolló en 1980 por la compañía Motorola. Es un protocolo serial síncrono, que tendrá una interfaz maestro-esclavo al igual que el  $I^2C$ , pero en este caso requerirá de cuatro líneas. El aumento en el número de líneas se debe a que los canales de envío del maestro al esclavo y el de envío del esclavo al maestro son distintos y separados. Esto le permite disponer de comunicación Full Duplex, es decir, el maestro podría enviar y recibir simultáneamente.

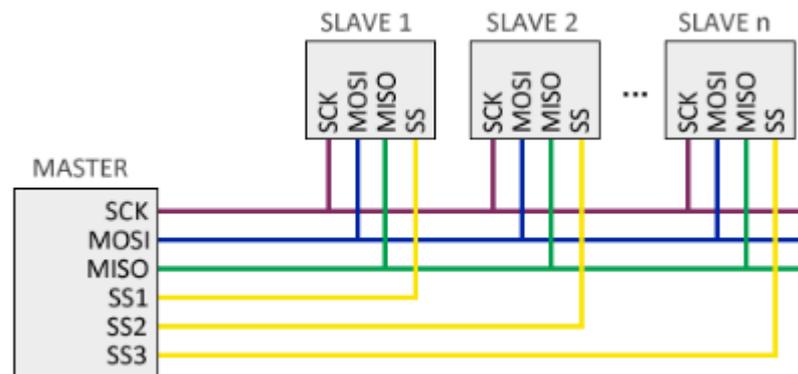


Figura 46: Comunicación SPI (Llamas, L.)

Las tres líneas principales son:

- MOSI (Master-out, Slave-in)
- MISO (Master-in, Slave-out)
- SCK (Clock)

Y además se añadiría una línea de selección de esclavo para cada esclavo que tengamos en nuestro esquema.

En definitiva, tiene la ventaja de enviar y recibir datos a alta velocidad y estar integrado en multitud de dispositivos. Sin embargo, en el caso que nos ocupa, no nos sería de utilidad, pues requeriría un cable extra por cada esclavo, y además no podemos saber si la señal ha sido recibida.

Por ello, el protocolo de comunicación implantado será  $I^2C$ .

### 5.3. MODOS DE CONTROL

#### 5.3.1. PC

Valoraremos la implementación en el prototipo de dos formas de control. La primera será a través de un PC. El usuario podrá indicar, a través de un teclado, cuál será el movimiento del robot. El PC se comunicará con un Arduino, que actuará como Maestro, mediante puerto serial. Esta comunicación está basada en el protocolo RS-232, y lo hará a una velocidad de 9600 baudios.

Cada uno de los módulos de nuestro robot llevará una placa electrónica con su microprocesador Attiny84, que controlará los cuatro actuadores del módulo. Estos microcontroladores serán los esclavos del Arduino, cada uno con una dirección determinada, y se encargarán de recibir las órdenes y enviar el acuse de recibo al Maestro (Arduino).

El Arduino, se comunicará con los microcontroladores Attiny mediante  $I^2C$ , enviará una orden a una dirección concreta, siendo esa dirección la del microcontrolador deseado, activando así el actuador correspondiente. El Attiny enviará de vuelta al Arduino la señal que ha recibido, pudiendo comprobar desde el PC que el microcontrolador recibió la orden correcta.

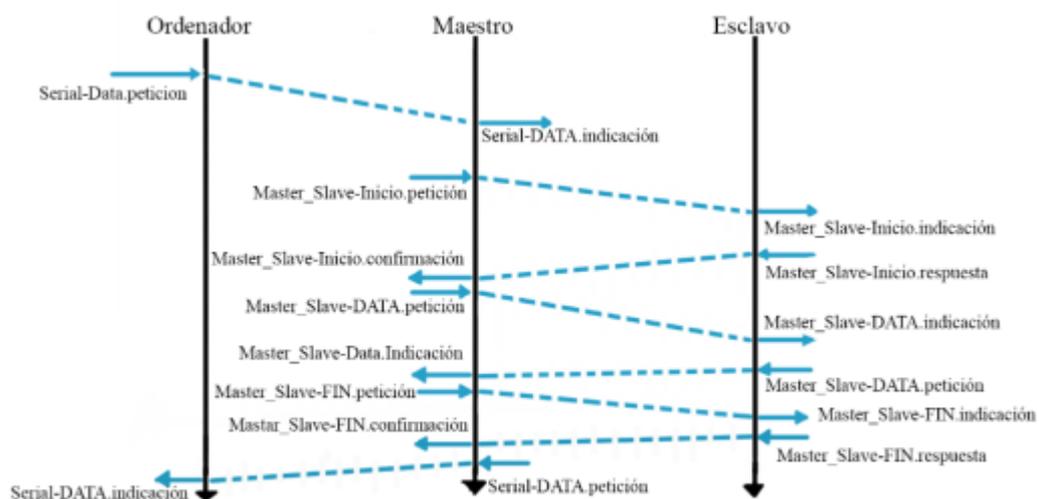


Figura 47: Ejemplo de comunicación (Hernández, S.)

### 5.3.2. Interfaz mediante Joystick

En este caso, el robot será controlado a través de un joystick externo. El joystick consta de dos potenciómetros, situados en los ejes X e Y. Esto proporciona dos señales analógicas, una de cada eje, proporcionándonos así un posicionamiento exacto de este.



Figura 48: Imagen del potenciómetro

Conectaremos el joystick a las entradas analógicas del Arduino, leeremos las entradas analógicas proporcionadas por el joystick y mapearemos los datos analógicos obtenidos a una medida de posición.

En nuestro caso no nos interesan medidas analógicas, ya que la actuación de nuestro robot es binaria, cada actuador solo puede estar completamente activado o desactivado. Por ello, los datos recibidos se tratarán como 4 únicas posiciones, Norte, Sur, Este y Oeste.

A partir de aquí el funcionamiento sería exactamente el mismo que en el caso anterior, el Arduino se comunicará mediante  $I^2C$  con cada módulo del robot, indicándoles la posición que ha recibido del joystick.

### 5.4. COMPONENTES

En este apartado se analizarán los integrantes de todo el entorno envuelto en la comunicación.

- **PC:** Se encargará de ser la unidad neurálgica de nuestro robot, así como el primer receptor del movimiento que desee efectuar el usuario.
- **Arduino:** Es una placa de desarrollo, que contiene un microprocesador reprogramable, así como una serie de pines que nos permiten interactuar en forma de entradas y salidas. Será el Maestro de nuestro sistema de comunicación, y controlará por tanto los distintos Esclavos que formen el robot.
- **Attiny84:** Son una serie de microprocesadores que pueden estar disponibles en unos encapsulados de apenas unos milímetros. Disponen de varias entradas y salidas e incluso de salidas moduladas por ancho de pulso (PWM). Serán los esclavos del ecosistema, cada anillo o módulo del robot dispondrá de uno.

- **Joystick:** Dispositivo externo que enviará directamente al arduino su posición, con el fin de que este dé las órdenes al esclavo que corresponda.
- **Bus de comunicación:** Atravesará por el centro los módulos, recorriendo toda la longitud del robot. En nuestro caso serán solamente dos cables debido a la utilización del protocolo  $I^2C$ , SDA y SCL.

## 5.5. CIRCUITO ELECTRÓNICO

### 5.5.1. Introducción

Tal y como se ha comentado anteriormente, partimos del diseño de Trabajos de Fin de Grado anteriores. Contamos con una serie de placas ya diseñadas, así como una elección de componentes que se justificó en los trabajos mencionados [Hernández, S. (2018)]. No obstante, veremos que tendremos que realizar varias modificaciones en el circuito teórico que se planteó entonces y tratar de aplicar esos cambios con la menor variación posible de las placas que disponemos.

### 5.5.2. Diseño electrónico

En primer lugar, abordaremos la activación de los actuadores. Para ello, leyendo la hoja de datos del fabricante de Flexinol, necesitamos una corriente de casi 500mA para activarlos correctamente. Además de otros problemas que se tratarán en lo sucesivo, esta circunstancia requiere de la implementación de algún elemento que actúe como un interruptor electrónico, pues la señal máxima de salida de los microprocesadores a emplear es de 40mA.

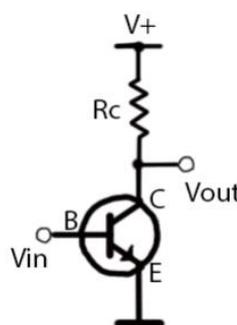


Figura 49: Transistor en EC

Para ello, se utilizará un transistor NPN en Emisor común. Aplicando la tensión necesaria a la base, se cerrará el circuito donde se encuentra nuestro actuador, circulando una corriente de colector que será la ofrecida por nuestra fuente de alimentación.

En este caso, se implementará un PWM para controlar la tensión y corriente con la que alimentamos nuestro actuador.

Es importante tener en cuenta que los transistores proporcionados y elegidos en el diseño anterior, tienen una corriente de colector máxima de unos 200mA, y esto es menos de la que necesitamos para activar el Nitinol. Es por ello por lo que, en nuestro prototipo, no deben excederse largos periodos de tiempo con el actuador en funcionamiento. Esto se solucionaría fácilmente con otro tipo de elemento o de transistor, por ejemplo con transistores Mosfet en lugar de BJT.

No obstante, como son los transistores y las placas son las que disponemos, el prototipo se realizará con ellos, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores para futuros prototipos o miniaturizaciones.

### 5.5.3. Cálculos

Debemos calcular la intensidad de base del transistor, en relación con la Beta y la corriente de colector, para así obtener la resistencia de base apropiada.

El fabricante indica que la  $h_{fe}$  del transistor es aproximadamente 60 para 500mA como podemos observar en la Figura 49.

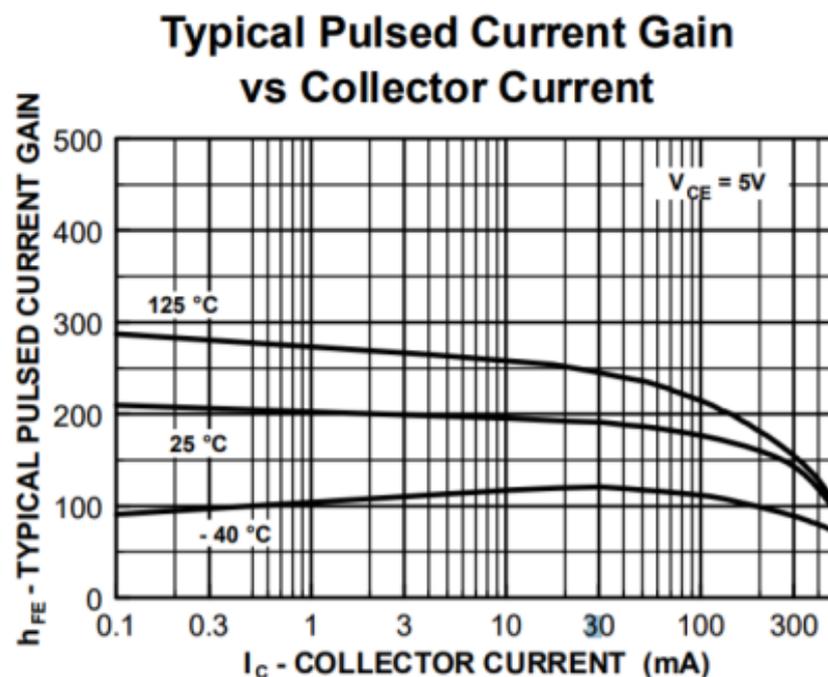


Figura 50: Variación de la  $h_{fe}$  con respecto a  $I_c$

Analizando la malla de entrada con la segunda ley de Kirchoff, obtenemos que la tensión de entrada se relaciona de la siguiente manera con la corriente y resistencia de base:

$$V_i = V_{BE} + I_b \cdot R_b \quad (\text{Ecuación 1})$$

Además, conociendo  $\beta$ , relacionamos la corriente de colector con la corriente de base de la siguiente manera:

$$I_c = \beta \cdot I_b \rightarrow I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{500mA}{60} = 8.5mA \quad (\text{Ecuación 2})$$

Sustituyendo en la Ecuación 1 la Intensidad de base obtenida en la Ecuación 2, procedemos a obtener nuestra resistencia de base:

$$R_b = \frac{V_i - V_{BE}}{I_b} = \frac{5 - 0.9}{8.5mA} = 480 \Omega \quad (\text{Ecuación 3})$$

#### 5.5.4. Modificaciones de la placa

En la placa mostrada en la Figura 51 se habían propuesto dos etapas diferenciadas. En primer lugar dos transistores se encargaban de proporcionar el valor del PWM determinado para la activación de los actuadores, y, por otro lado se procedía a la activación del Flexinol.

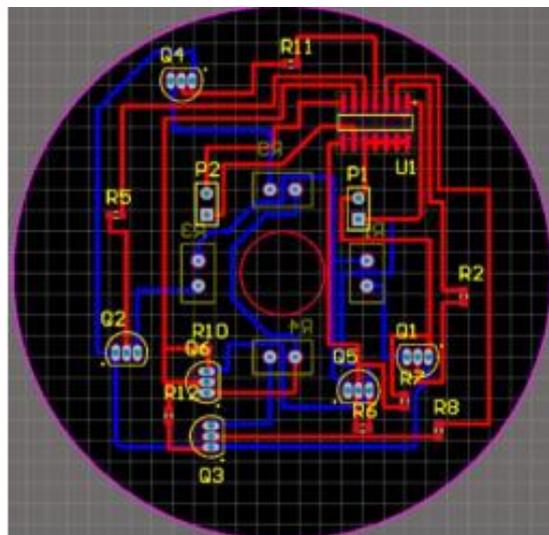


Figura 51: Placa de circuito impreso (Hernández, S.)

Enfocando el estudio en la reducción de componentes para una futura miniaturización, se ha decidido implementar el PWM con el propio transistor del actuador. De esta forma conseguimos regular la intensidad eficaz de la misma manera que lo hacían los transistores externos, y utilizamos estos mismos para decidir qué actuadores están activos.

Únicamente vamos a modificar el esquema, ya que disponemos de placas con el diseño original ya construidas y, siendo un prototipo en fase de pruebas, para esto no es necesario construirlas de nuevo. Debido a la naturaleza de los cambios, no será difícil aplicarlo en las placas que tenemos, bastará con reconducir las líneas por donde se encontrasen los transistores anteriormente.

A continuación realizaremos el esquema con los cambios ya implementados, las salidas no utilizadas del microprocesador se llevarán a tierra para que no interfieran en el correcto funcionamiento del dispositivo.

### 5.5.5. Esquema Final

Realizaremos en la herramienta de diseño electrónico Proteus Professional el esquema con los cambios implementados.

El esquema a mayor tamaño se añadirá al Anexo correspondiente, aquí se muestra el esquema provisional, procedemos a implementarlo en una protoboard y los resultados se muestran en el siguiente subapartado.

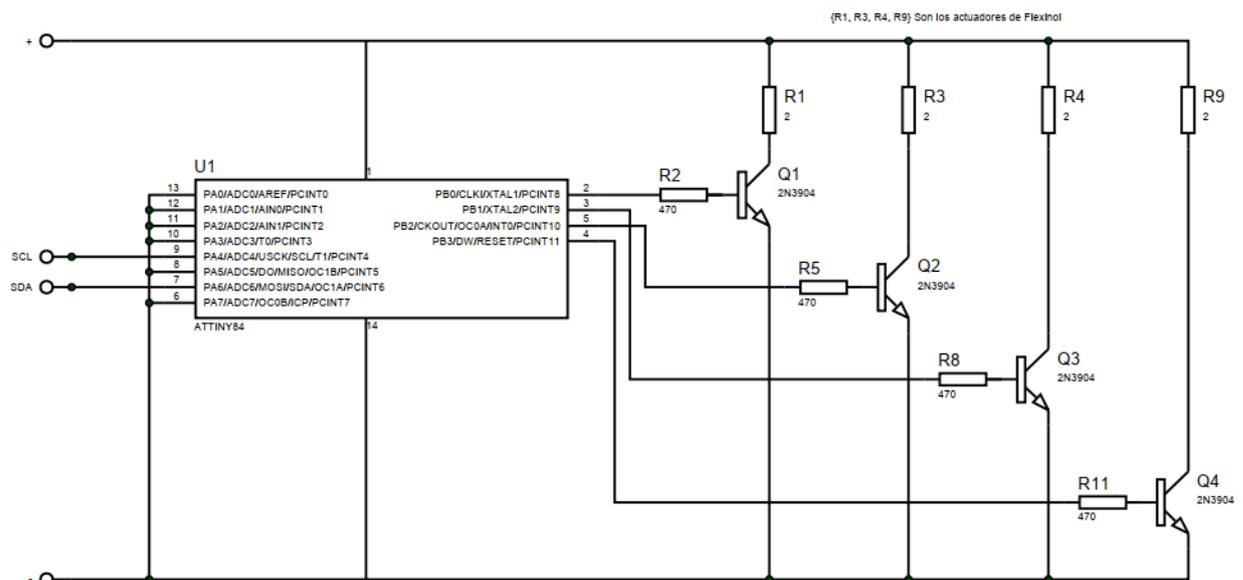


Figura 52: Esquema Final

### 5.5.6. Prototipado y pruebas

En este punto, procederemos a montar un circuito de pruebas en una protoboard, comprobando que los cálculos y los cambios inducidos en el diseño inicial tienen un comportamiento correcto.

El microcontrolador no ha sido programado todavía, por lo que aplicaremos una señal con un Arduino, simulando ser la salida del ATtiny. Para comprobar su funcionamiento, montaremos en la protoboard un transistor con su resistencia de base, la cual se conectará a una salida del Arduino. A su vez, colocaremos uno de los actuadores en la placa de modo provisional.

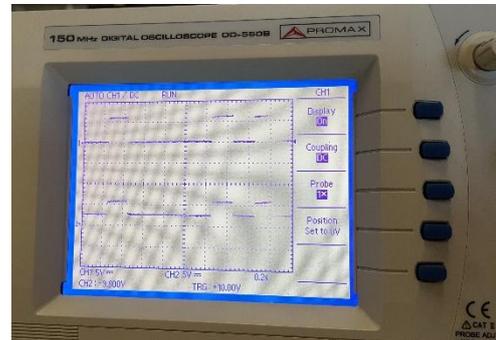


Figura 53: PWM generado con Arduino

Fijaremos un cable a cada lado del Nitinol los cuales conectaremos a la protoboard, pues los componentes no han sido soldados todavía en la placa.

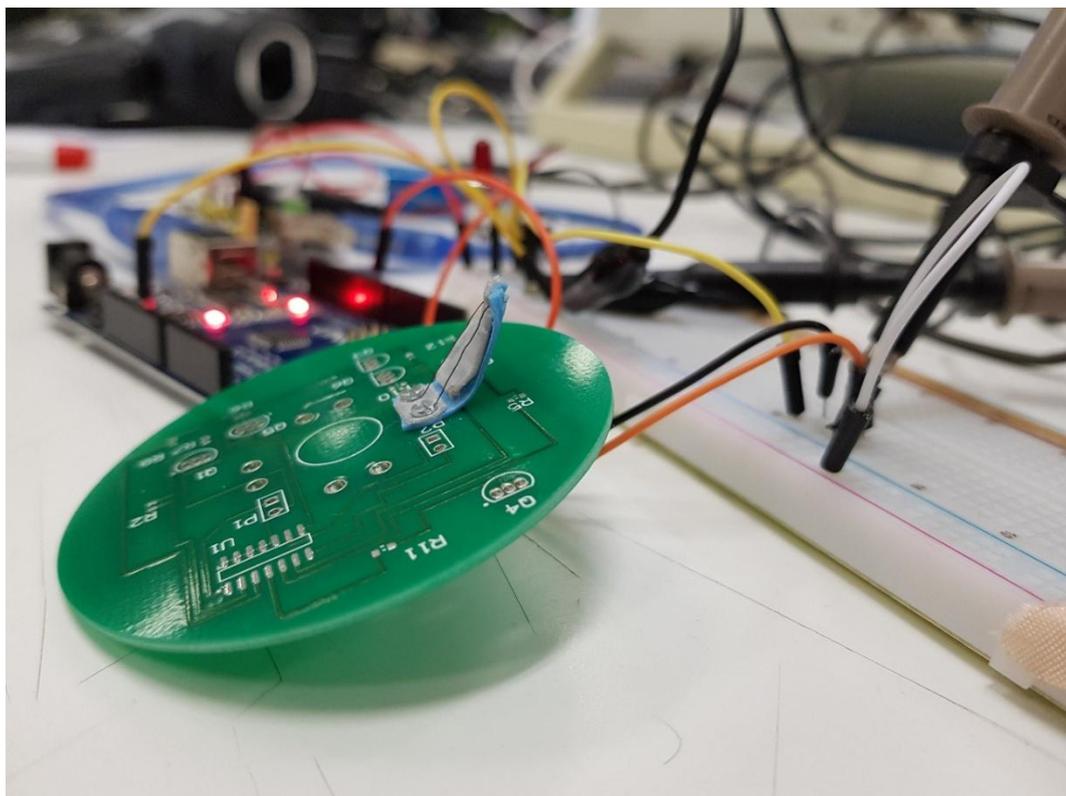


Figura 54: Elevación del actuador con el circuito diseñado

Se ha implementado una modulación por ancho de pulso (PWM) suficiente para elevar el actuador y mantenerlo en estado de activación. Consiste en emular una salida analógica con pulsos digitales (0-5V) variando el periodo y el ancho de pulso, de forma que la proporción de tiempo que está activada la señal se llamará ciclo de trabajo o DC (Duty Cycle).

Para ello, se han distinguido tres etapas, una de elevación inicial, una de mantenimiento y otra de reposo. Para lograr la elevación en aproximadamente un segundo, definiremos un DC del 90%. Después se ha reducido a un 50%, pues no requiere tanta corriente para mantenerse y así consumimos menos energía. Por último, el pulso se reduce al 0% para volver al estado de reposo.

Casos contemplados de ciclo de PWM:

- Activación: 90% del DC durante 1 segundo
- Mantenimiento activo: 50% del DC
- Desactivación: 0% del DC

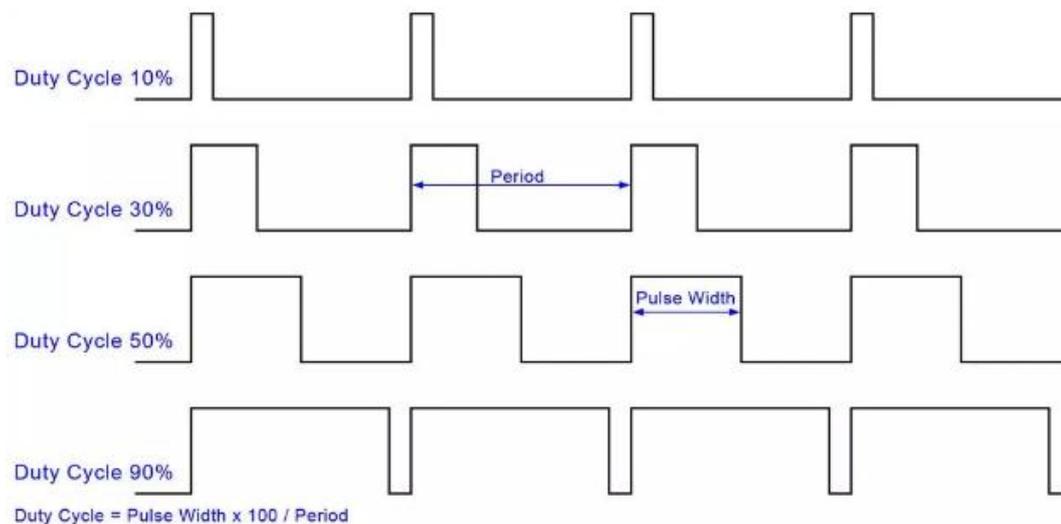


Figura 55: Modulación por ancho de pulso (PWM)

El resultado ha sido satisfactorio, pues el Flexinol actúa tal y como se esperaba.





# Capítulo 6. Programación de Microprocesadores





## 6.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha ido mostrando a lo largo del proyecto, este trabajo es eminentemente práctico, por ello, requiere una parte importante de programación. En éste capítulo tratará de aunar los distintos estudios previos, la correcta programación de los microcontroladores, tanto el Maestro como los Esclavos.

Por un lado habrá una parte de programación que será la que englobe a la comunicación  $I^2C$  que se estudió en el apartado correspondiente. Por otro, habrá otra parte que gestione la recepción de comandos por parte del usuario y su interpretación, para transformarlo en el movimiento propio del robot.

## 6.2. ARDUINO

En primer lugar hablaremos del Arduino, que será el Maestro de nuestro proyecto. Si algo caracteriza las placas de desarrollo de Arduino, es su interfaz sencilla, con un entorno de programación intuitivo y muy potente. Dispone de multitud de librerías y de comunidad en la que ayudarse, esto nos será muy útil para cualquier duda de implementación que podamos tener.

### 6.2.1. Entorno: IDE

El entorno que engloba a Arduino es una aplicación escrita en Java, que sirve de soporte a multitud de dispositivos, no solamente aquellos compatibles con Arduino. El programa permite escribir programas, cargar ejemplos predefinidos, también dispone de una sencilla comunicación mediante puerto serial entre otras muchas características.

El lenguaje de escritura será C o C++, con algunas características de lenguaje propias de Arduino.

El programa tipo consta de dos bloques principales, además de la zona de declaración de variables. Uno de los bloques es ejecutado una sola vez al inicio, o inmediatamente después de ejecutar un Reset, y el otro se repetirá en bucle continuamente, realizando las funciones deseadas.

```
1 //Zona DECLARACIONES
2
3 void setup() {
4   // Zona funcion SETUP
5 }
6
7 void loop() {
8   // Zona funcion LOOP
9 }
```

Figura 56: Estructura de un programa

### 6.2.2. Descripción de la placa y sus pines

Para comprender el desarrollo del programa, debemos conocer cómo funciona la placa, cuáles son sus partes y la función de cada una de ellas. De esta forma

podremos aprovechar todas las características que sean útiles para nuestro cometido.

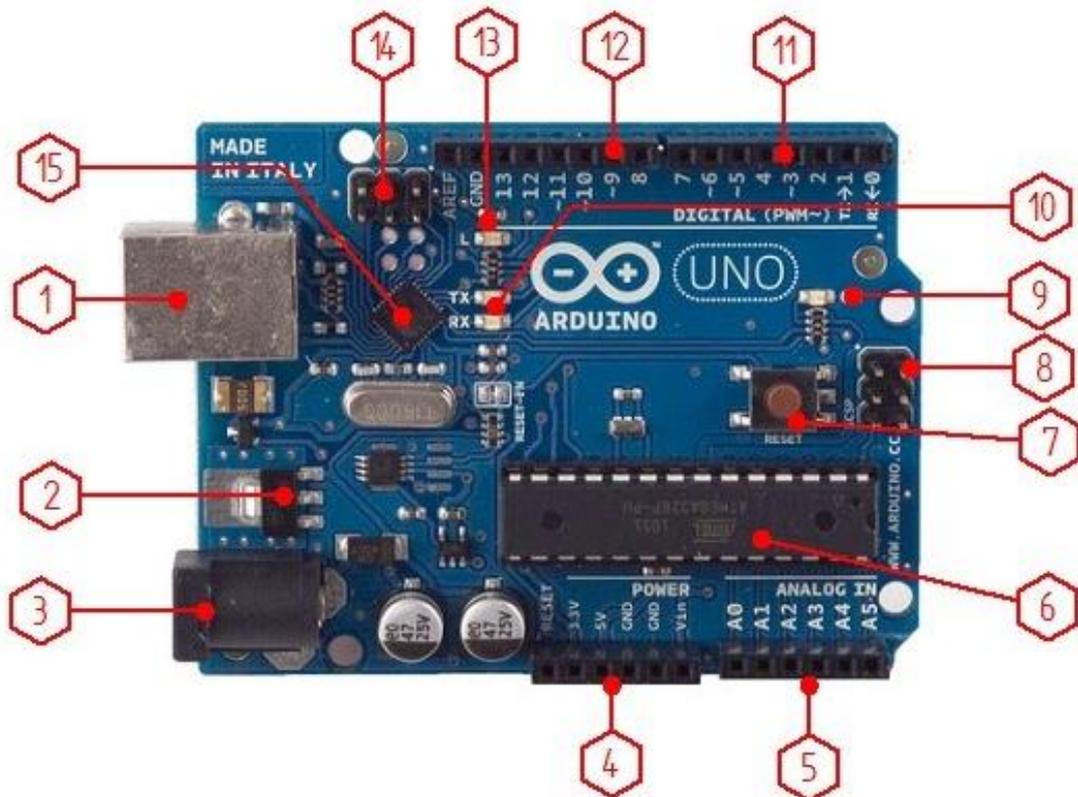


Figura 57: Imagen de las partes de un Arduino [temasdedisenoymanufactura/arduino]

Dentro de la propia marca encontramos muchos modelos, aunque nosotros utilizaremos un Arduino Uno, por la facilidad de conexión en sus pines y por tener algunas unidades disponibles.

Procedemos a explicar cada una de las partes señaladas en la Figura 55, es una imagen muy completa e interesante para poder explicar con claridad todos y cada uno de los componentes que conforman esta placa de desarrollo.

1. Conector USB del Arduino, tiene múltiples funciones, entre otras la comunicación, la programación y la fuente de alimentación.
2. Además de a través del puerto 1, también puede alimentarse a través del que está marcado con el número 3 en la figura. Este número 2 será un regulador de voltaje para que el voltaje suministrado por 3 sean 5V regulados.



3. Puerto adicional para fuente de alimentación.
4. Pines para el conexionado, los indicados con este número serán pines que suministran tensión (3.3V o 5V), GND o el Reset.
5. Puertos analógicos. Estos pines servirán de entrada a sensores analógicos. Recibirán voltajes situados entre 0 y 5 Voltios.
6. Microcontrolador ATmega328. Es el punto neurálgico de nuestro arduino, será el que programemos a través del IDE de Arduino.
7. Botón físico de RESET. Sirve para reiniciar el Arduino y que inicie el programa que esté ejecutándose desde el principio.
8. Pines ICSP, se utilizan para programar microcontroladores sin la necesidad de ser retirados del circuito integrado o protoboard donde estén colocados.
9. LED de encendido, se ilumina cuando el Arduino está en marcha.
10. LEDs de Tx y Rx, estos indican la comunicación con el ordenador, e indican cuándo se están enviando o recibiendo datos.
11. Pines de entrada o salidas digitales del 0 al 7. Los pines indicados con el símbolo ~ indican que pueden ser utilizados como PWM, es decir, por modulación de ancho de pulso, haciendo el efecto de una salida analógica.
12. Tienen la misma función que los explicados en el apartado 11. También incluyen una salida más de GND y una referencia AREF. Además, el pin 13 lleva una resistencia acoplada en serie, pudiendo así conectar directamente un led para realizar comprobaciones.
13. LED que se corresponde con el pin 13.
14. Pines ICSP.
15. Chip encargado de la comunicación serial mediante USB.

### 6.3. ATTINY84

El ATTiny es un microcontrolador de reducido tamaño, que dispone de 14 pines, de los cuales 12 de ellos pueden ser entradas y salidas indistintamente [microchip.com].

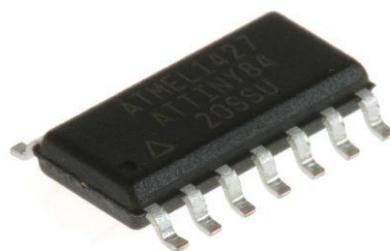


Figura 58: Attiny84 encapsulado SOIC14



Tiene la capacidad de implementar modulación mediante ancho de pulso PWM. Debido a su pequeño tamaño es perfecto para aplicaciones como la que nos ocupa.

Debemos conocer qué función tiene cada pin, por lo que buscaremos un esquema en la documentación del fabricante.

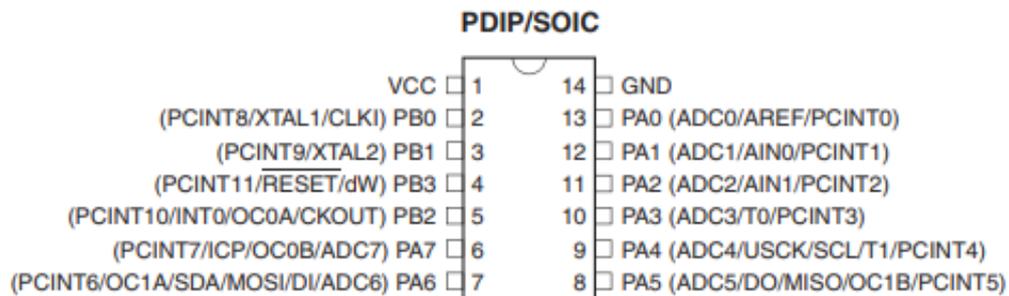


Figura 59: Pines de conexionado del ATtiny84

A continuación explicaremos los modos de programación que hemos explorado, algo más complejos que en Arduino, entre otros motivos por el déficit de un puerto USB y una interfaz como la de este.

### 6.3.1. Modo de programación

A priori, para poder programar un procesador ATMEL AVR necesitaríamos un programador para tal efecto. Sin embargo, realizando unas pequeñas preparaciones en nuestro Arduino Uno, es posible utilizarlo como programador ISP. Esto nos presenta gran cantidad de ventajas, pues será posible programar los microcontroladores ATtiny84 utilizando un Arduino como programador a través del propio IDE de Arduino.

#### 6.3.1.1. Preparación del Arduino como ISP

- En primer lugar debemos añadir soporte en el IDE de Arduino para el ATtiny84. Clicamos en Archivo, Preferencias, y añadimos un Gestor Adicional de Tarjetas. En este caso añadiremos el proporcionado por Dr. Azzy para los chips ATtiny, será el URL que aparece en la Figura 60 [drazzy.com].

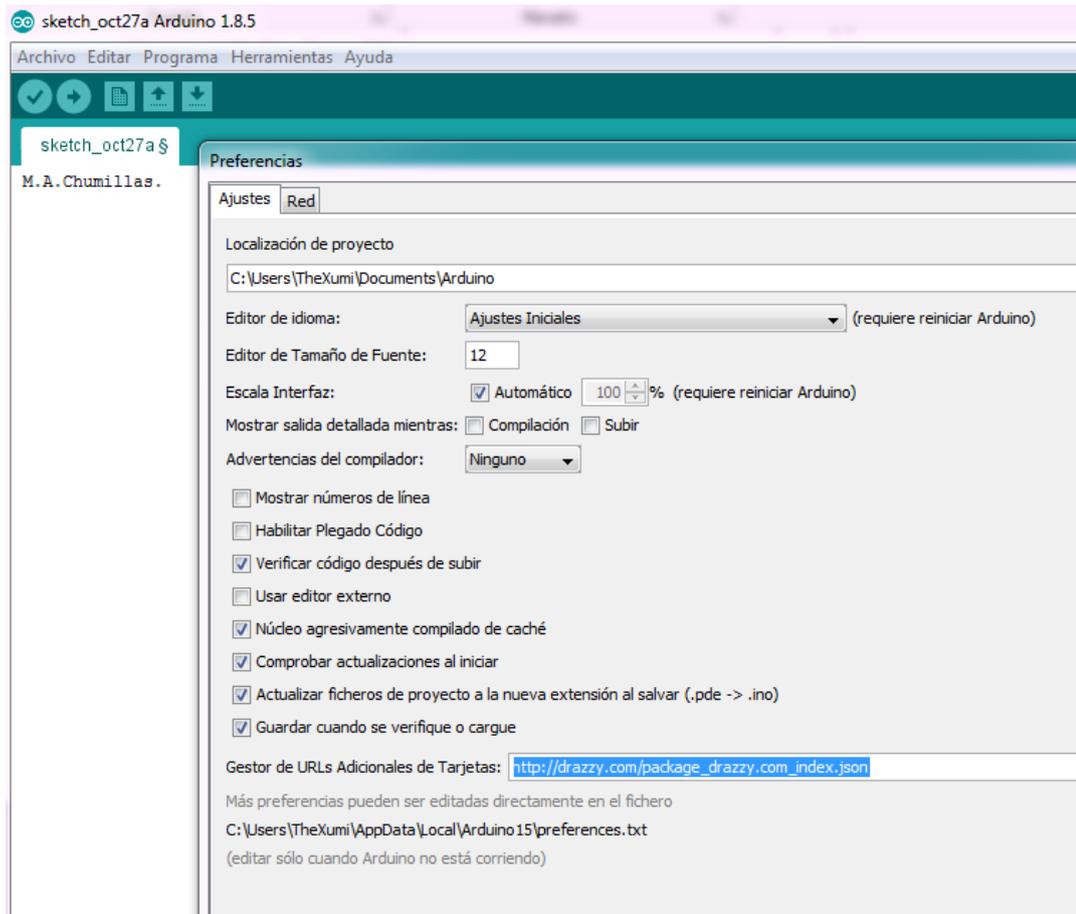


Figura 60: Adición de nuevo Gestor de Tarjetas

- A continuación prepararemos el Arduino como programador ISP. En herramientas, seleccionaremos la placa, en nuestro caso seleccionaremos “Arduino Uno”. Además, en la opción “Programador” seleccionaremos la que aparece como “AVR ISP”. Podemos ver las opciones comentadas en la Figura 61.

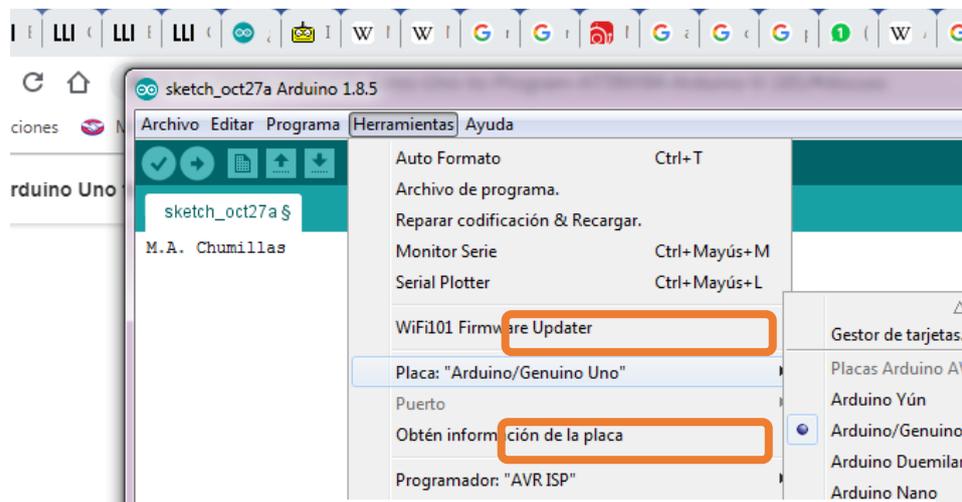


Figura 61: Configuración Arduino como ISP

- Por último, en la sección de ejemplos seleccionamos el sketch “Arduino ISP” disponible en el IDE de Arduino y lo subimos a la placa. Ya tenemos nuestro arduino preparado para el siguiente paso.

### 6.3.1.2. Conectando el ATtiny al Arduino

- Materiales
  - o Un Arduino
  - o Attiny84
  - o Adaptador SOIC – DIP
  - o Condensador 10  $\mu$ F
  - o Protoboard
  - o Cables para protoboard

El encapsulado del ATtiny que utilizaremos en nuestro prototipo será tipo SOIC. Como ventajas obtenemos un reducido tamaño y la capacidad de un montaje superficial. Sin embargo, resulta mucho más incómodo en su programación que un componente pasante, ya que no puede ser colocado directamente en una protoboard.

Para la programación, se buscó un adaptador adecuado de encapsulado para así poder utilizarlo en la protoboard como un componente más. En primer lugar se realizó un diseño en 3D de un posible adaptador para la programación, se imprimió en 3D y se le añadió un cable en cada patilla para poder conectarlo en la placa de prototipado.

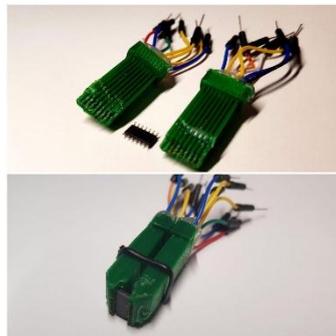


Figura 62: Adaptador impreso

El adaptador era funcional, pero seguía sin ser la manera más práctica para la programación, ya que en algunas circunstancias los pines no hacían buen contacto, provocando continuos errores.

Posteriormente se consiguió un adaptador ya fabricado, que cumplía perfectamente su cometido. Para colocar el microchip se presiona levemente la parte superior, se introduce el chip y las patillas metálicas del adaptador quedan presionando las del chip, permitiendo obtener un DIP14 a partir del SOIC14.

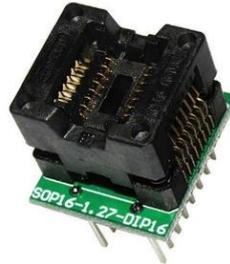


Figura 63: Adaptador SOIC-DIP

Una vez conseguido el adaptador, se procede a realizar el conexionado con el arduino. Es importante colocar un condensador entre el reset y tierra, solamente es necesario si se realiza la programación con un Arduino Uno.

Los pines del 13 al 11 del Arduino se corresponden con los puertos SPI del ATmega, y los llevaremos a los pines SPI del ATtiny. El pin 10 se encargará de resetear el ATtiny.

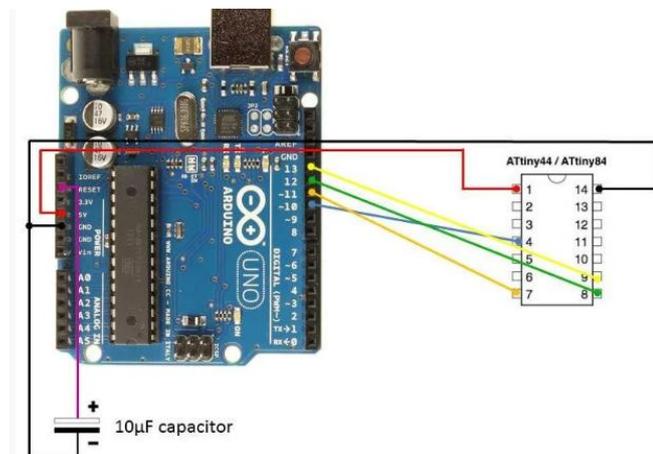


Figura 64: Esquema de conexionado

### 6.3.1.3. Preparación del Arduino

Por último, tal y como observamos en la Figura 65, solo falta configurar unos determinados parámetros del Arduino, para que al compilar cargue los programas en el ATtiny. En Herramientas, seleccionamos la placa ATtiny en lugar de Arduino Uno, y se abrirá el desplegable de opciones mostrado. Una vez fijadas todas las opciones, pulsamos en “Quemar Bootloader”. Ya tendremos nuestro Arduino listo.

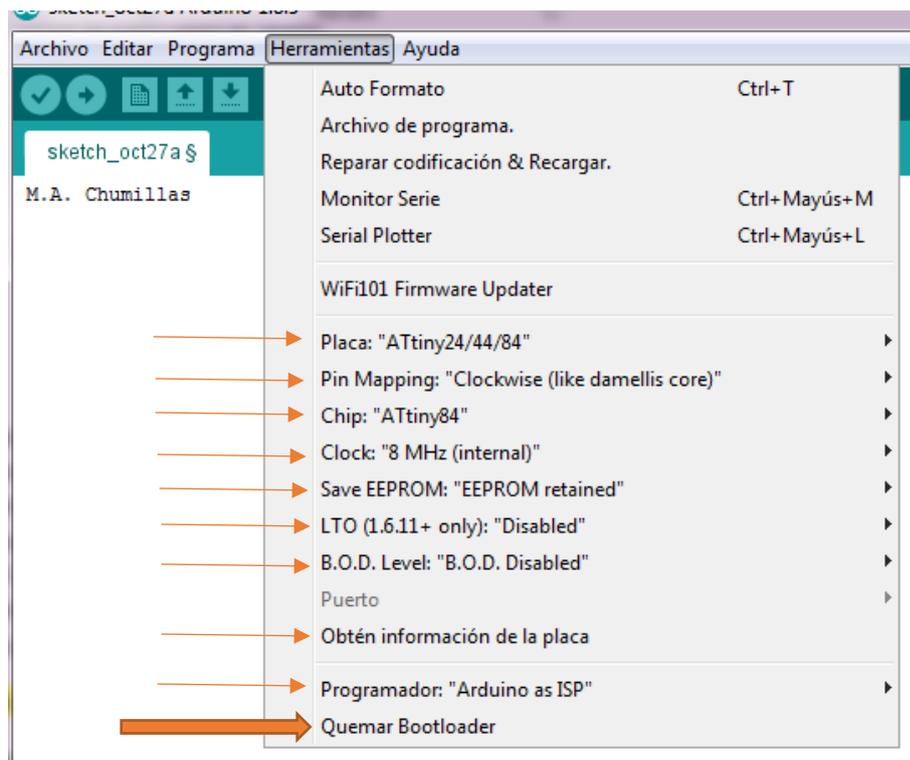


Figura 65: Configuración Arduino como ISP

### 6.3.2. Primera prueba

Realizamos un programa de muestra para comprobar que el ATtiny ha sido correctamente programado, para ello cargaremos un programa sencillo de un LED intermitente, que será controlado íntegramente por el ATtiny. El funcionamiento ha sido correcto, por lo que deducimos que tanto el programador como las librerías utilizadas son las correctas. Concluidas las pruebas más sencillas, podemos continuar con el proceso completo. El programa de prueba se adjunta en el Anexo I.

### 6.4. LIBRERÍAS $I^2C$

Una vez el funcionamiento y la programación del microcontrolador ATtiny en un programa sencillo es correcta, trataremos de utilizar las librerías de  $I^2C$  y realizar un programa para ATtiny y otro para Arduino, con el fin de que puedan comunicarse y entablar la configuración deseada de Maestro-Esclavo.



#### 6.4.1. Conexiones físicas entre Arduino y ATtiny

Las conexiones entre ellos serán muy sencillas, pues ambos dispositivos cuentan con dos pines cada uno llamados SDA y SCL, que como comentamos en el capítulo de comunicación, serán los necesarios para el protocolo  $I^2C$ . Simplemente conectaremos el SDA del Arduino con el SDA del ATtiny, y haremos lo mismo con los pines SCL. Obviaremos las conexiones de pull-up, ya que el Arduino posee unas internas, y serán suficientes para las velocidades que necesitamos.

#### 6.4.2. Librerías utilizadas

Para los chips ATtiny84 como Esclavo, es ampliamente utilizada la librería TinyWireS, por ello en el encabezado del programa incluiremos “TinyWire.h”, mientras que en el programa del Maestro incluiremos “Wire.h”.

#### 6.4.3. Programación del Arduino (Maestro)

Después de definir las variables e incluir los encabezados correspondientes a las librerías utilizadas, iniciamos la comunicación con el comando “Wire.beginTransmission(Modulo)”. Es de vital importancia conocer la dirección del Esclavo con el que nos queremos comunicar.

A continuación, bastará con escribir o solicitar datos al Esclavo con el que hemos iniciado la transmisión, lo haremos mediante los comandos “Wire.write()” y “Wire.read()” respectivamente. Para terminar la comunicación ejecutaremos “Wire.endTransmission()”.

#### 6.4.4. Programación de los ATtiny84 (Esclavos)

Tras incluir el encabezado comentado anteriormente y definir las variables y pines utilizados en el programa, es importante definir una dirección al Esclavo en el caso que no venga impuesta por hardware. Después procedemos a iniciar la conexión con el bus  $I^2C$ . Lo haremos enviando la dirección del esclavo con el comando “TinyWireS.begin(Direccion\_Esclavo)”.

Después, para entablar la comunicación, se impone una condición, y es que el Maestro quiera enviar o recibir algún dato. Si la comunicación está disponible bastará leer o escribir datos con el comando “TinyWireS.read()” o bien “TinyWireS.write()”.

### 6.5. PRUEBA CONJUNTA

La última prueba que realizaremos con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de la programación de los microcontroladores y de la comunicación  $I^2C$ , será encender unos LEDs. Lo haremos mediante puerto



Serial, el usuario introducirá en el monitor Serial el LED que desea encender. El Arduino (Maestro) leerá el dato del puerto Serial, y lo enviará mediante  $I^2C$  al ATtiny84 (Esclavo). Este se encargará de encender el LED deseado y de comunicar al Maestro qué dato ha recibido, para confirmar que la comunicación ha funcionado correctamente.



# Capítulo 7. Construcción de Prototipo funcional





## 7.1. INTRODUCCIÓN

En el transcurso de este capítulo, se realizará todo lo expuesto anteriormente. En primer lugar procederemos a recopilar todo lo que necesitamos para construir todas y cada una de las partes que conforman el robot. Se diseñarán cada una de las piezas, para posteriormente ser impresas en 3D. Se soldarán todos los componentes en las placas fabricadas, comprobando que todas las uniones finales son correctas. Por último, programaremos los microcontroladores y realizaremos las distintas pruebas finales.

## 7.2. LISTA DE MATERIALES

Para una mejor categorización de cada componente, dividiremos la relación de materiales en cada una de las partes que conforman el robot.

### 7.2.1. Actuadores

- Pieza plástica de ABS: 4 unidades por módulo
- Cable de Flexinol: 0,5m aproximadamente
- Tornillería: 8 unidades 1,6x10mm

### 7.2.2. Componentes electrónicos

- PCB: 1 por módulo
- Microcontrolador Attiny84: 1 por módulo
- Transistores NPN: 4 por módulo
- Resistencias: 4 por módulo
- Programador Attiny
- Joystick
- Arduino
- Fuente de alimentación
- Cable

### 7.2.3. Carcasa exterior

- Base soporte
- Módulo de ABS
- Mando para Joystick

## 7.3. MEMORIZACIÓN DE FORMA DEL NITINOL

Se van a dar la forma deseada al Nitinol, con el objetivo de que tenga la mayor capacidad de actuación posible. Para ello, cortaremos secciones del cable de Flexinol de unos 10 centímetros aproximadamente. Tal y como se describió en el capítulo a tal efecto, la forma más óptima que puede adoptar el Nitinol en

nuestro caso es helicoidal, teniendo un buen compromiso entre fuerza y distancia de contracción realizada.

Procedemos dando vueltas al cable alrededor de un cilindro de pequeño diámetro, a menor diámetro más vueltas dará y mayor recuperación tendrá. En nuestro caso, utilizaremos un alfiler. Sujetaremos los extremos y aplicaremos calor con un soplete durante unos segundos, a una distancia de 15 centímetros, pues así lograremos los 400-500 grados deseados. Al finalizar el tiempo será sumergido en agua fría para enfriarlo, y seguiremos reconfigurando los demás fragmentos de Nitinol.

Después, aplicando tensión en los extremos mediante una pila de 1.5V comprobaremos la contracción de todos los cables que hemos tratado.

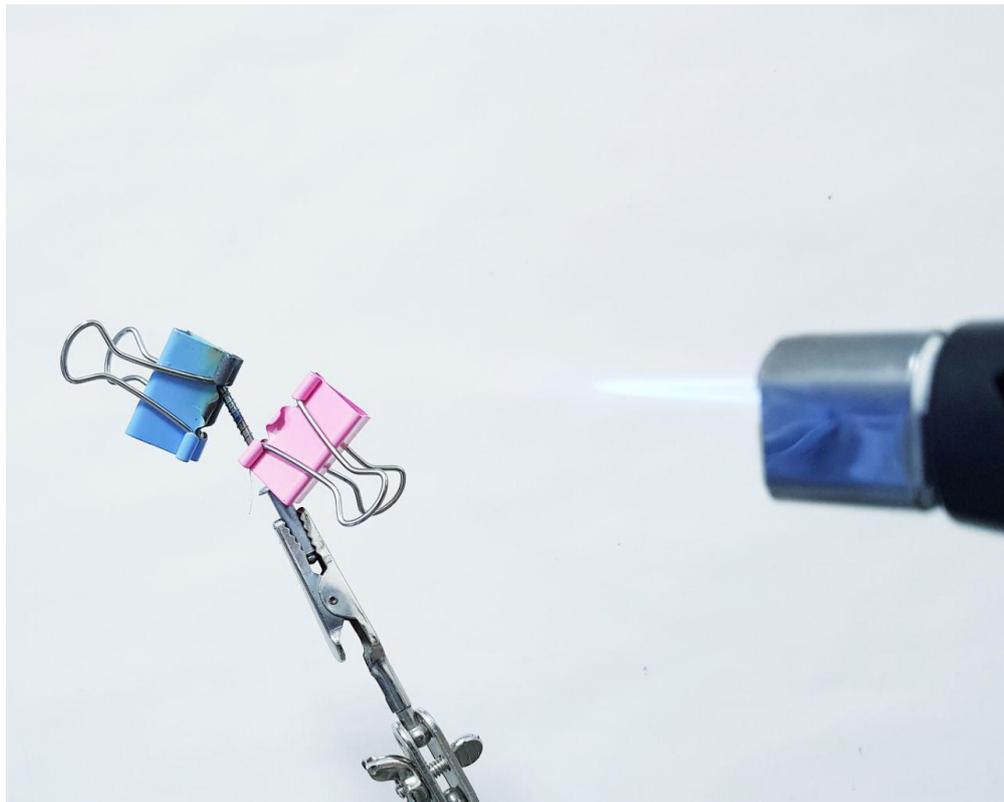


Figura 66: Memorización de forma del Nitinol

#### 7.4. DISEÑOS 3D: IMPRESIÓN

En primer lugar, se realizará, modificará o finalizará el diseño elegido de cada una de las piezas. Posteriormente se tratará mediante software el modelo, de forma que sea interpretable por la impresora 3D, para, por último, realizar la impresión.



### 7.4.1. Tratamiento software

Principalmente utilizaremos dos programas, uno para diseñar y modelar los archivos 3D y otro para tratar los modelos obtenidos para su posterior impresión.

#### 7.4.1.1. Autodesk Inventor

El programa elegido para modelar será el Autodesk Inventor. Es una potente herramienta de diseño 3D, que permite diseñar, renderizar y simular distintos proyectos. Una vez exportado el diseño terminado, lo abriremos con un *Slicer*, que será el último paso antes de proceder a la impresión.

#### 7.4.1.2. Simplify 3D

El *Slicer* es un programa que, como su propio nombre indica, se encarga de “filetear” la pieza 3D. La impresora es una herramienta de fabricación aditiva, que va depositando material por capas, es por ello por lo que necesita que la pieza esté dividida en esas capas. El programa se encargará de transformar la figura en una sucesión de instrucciones en lenguaje G-CODE, que será interpretado y ejecutado con la impresora.

### 7.4.2. Modelado 3D

Se ha diseñado un modelo del módulo completo, que consta de los actuadores, la placa de circuito integrado y de la parte externa de cada módulo, que será el propio cuerpo del robot. En el programa de modelado se han superpuesto varios módulos, mostrando el resultado de cómo se vería el robot con más de un módulo.

En el prototipo actual no se considera el tubo flexible central que serviría para alojar los cables de alimentación y comunicación, así como dar una cierta rigidez estructural al conjunto.

Tampoco se ha tenido en cuenta el recubrimiento exterior de material biocompatible que aportará también un efecto de muelle elástico facilitando la vuelta al estado de reposo de los actuadores cuando se desactivan.



Figura 67: Torre dispuesta por módulos. (Úbeda, R 2018)

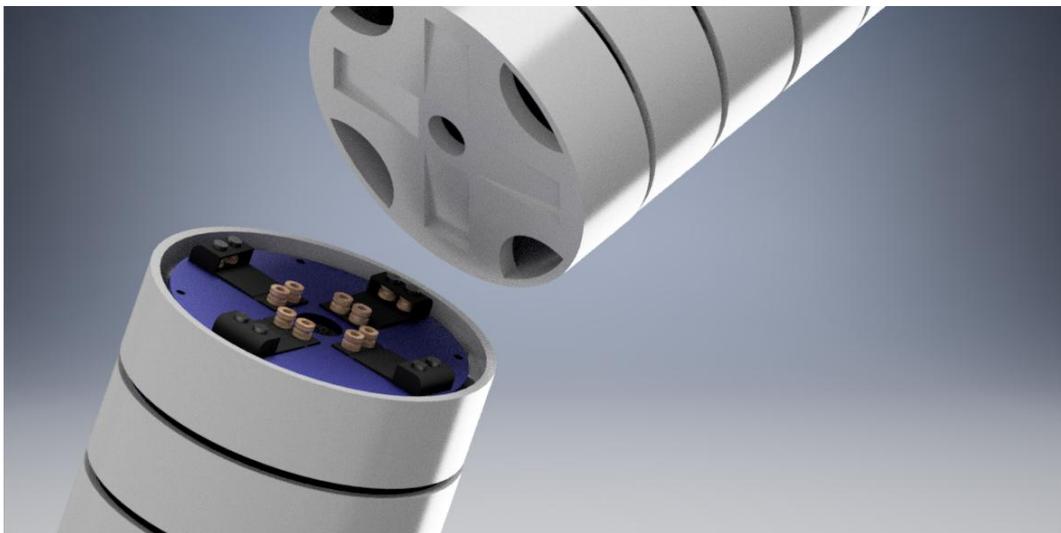


Figura 68: Foto al detalle de la unión entre módulos. (Úbeda, R 2018).

### 7.4.3. Preparación de la impresora

Las impresiones las realizaremos nosotros mismos, por lo que podremos preparar la impresora y sus parámetros a nuestra elección, buscando en cada pieza las características que deseemos.

Ya tenemos los ficheros generados por nuestro programa, y tenemos varias opciones de cargarlos en la impresora. La primera opción es mediante USB, podríamos copiar los archivos G-CODE en una memoria USB y conectarla a la impresora, o bien conectando el portátil mediante USB al puerto de la impresora.

Nosotros lo realizaremos mediante conexión inalámbrica, pudiendo controlar en todo momento parámetros como velocidad, temperatura, % realizado e incluso hora estimada de finalización. Esto lo lograremos utilizando un servicio denominado “Octoprint”.

Dependiendo de la pieza a imprimir disponemos de varios materiales. Si es una pieza que no requiere flexibilidad ni ningún esfuerzo metálico utilizaremos PLA, ya que no es tóxico y es más sencillo de imprimir. Por el contrario, si necesitamos algo de resistencia utilizaremos el ABS, que utiliza una mayor temperatura de impresión y base calefactada. De igual forma, para piezas en las que el detalle sea importante, configuraremos una menor altura de capa.

#### 7.4.4. Actuadores

En este caso será donde utilizaremos el ABS, pues la pieza flexionará siempre en la misma zona, y por ello necesita algo de resistencia a la fatiga y flexibilidad. Además, debe soportar la cantidad de calor que desprenda el Flexinol. Aun así, será una pieza de desgaste que desempeñará su función durante un determinado número de ciclos. No obstante, al tratarse de un prototipo no es una falla crítica.

Anteriormente se ha explicado con dedicación el diseño de estos actuadores, por lo que nos limitaremos a mostrar las imágenes del modelado y tratamiento de estos en el programa de impresión, así como el resultado final.

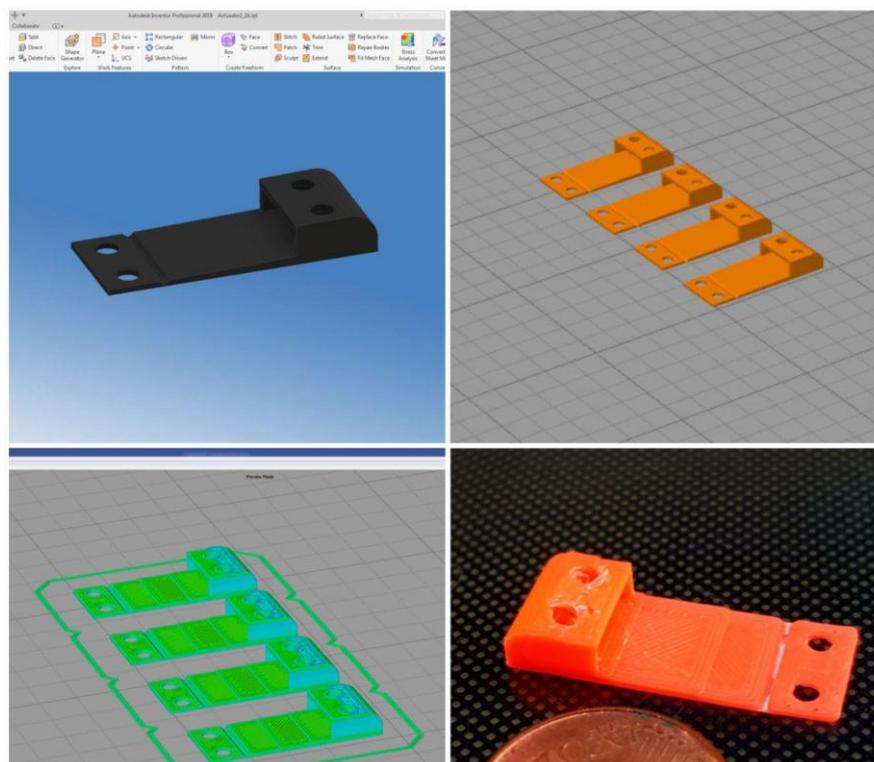


Figura 69: Diseño y construcción del actuador.

#### 7.4.4.1. Cuerpo del Robot

De igual forma, se realiza el diseño del propio módulo, que es la parte que contendrá la placa con sus actuadores. Cabe destacar que este componente no requiere ningún esfuerzo mecánico, por lo que se realizará con PLA. Las ventajas de imprimir con este material serán, entre otras, la facilidad de uso, menor temperatura de impresión y la no toxicidad, pues está fabricado a partir de maíz.

Imprimiremos dos, una para el módulo completo de muestra y otra para comprobar su elevación con la activación de los actuadores.

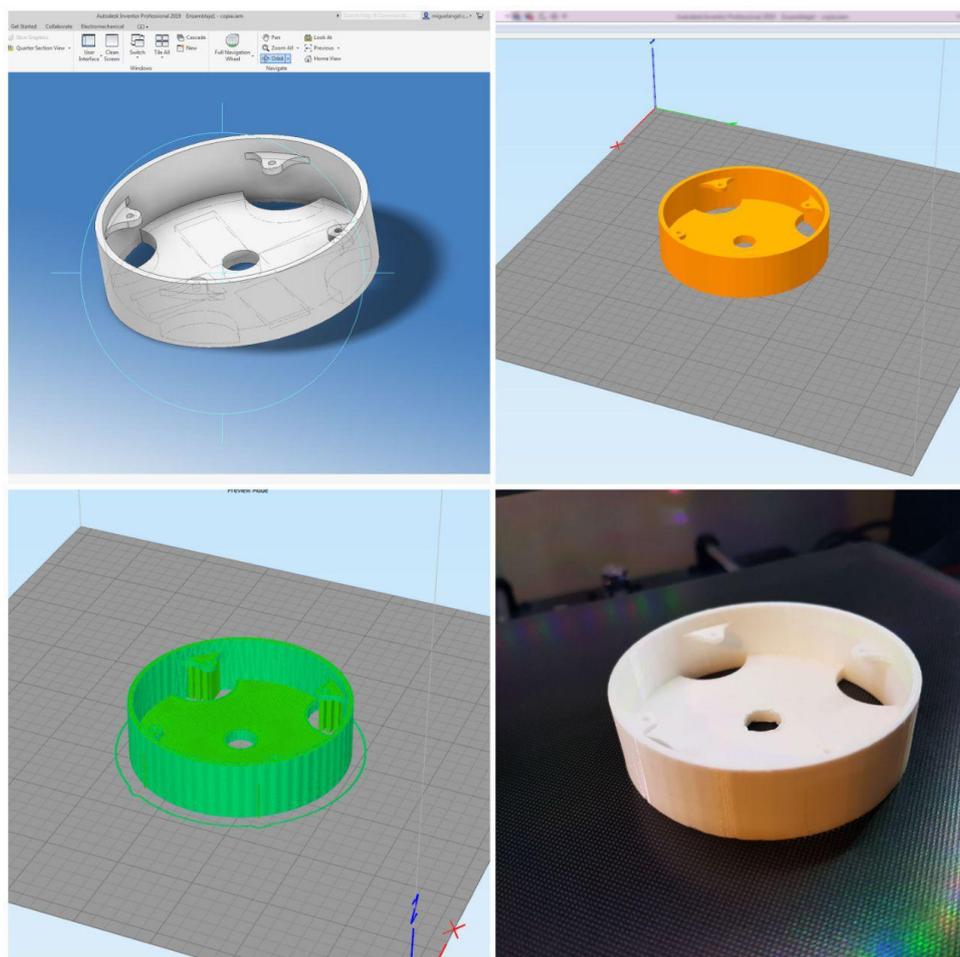


Figura 70: Diseño y construcción del cuerpo del módulo

#### 7.4.4.2. Soporte

Lo siguiente que diseñaremos será una base para el primer módulo, pues servirá de soporte y para tener un acceso lateral al cableado. Esta base de tronco de pirámide sólo será construida para el prototipo, con el fin de poder

mantenerlo en una posición vertical fija. El módulo se colocará anclado en ella en la parte superior.

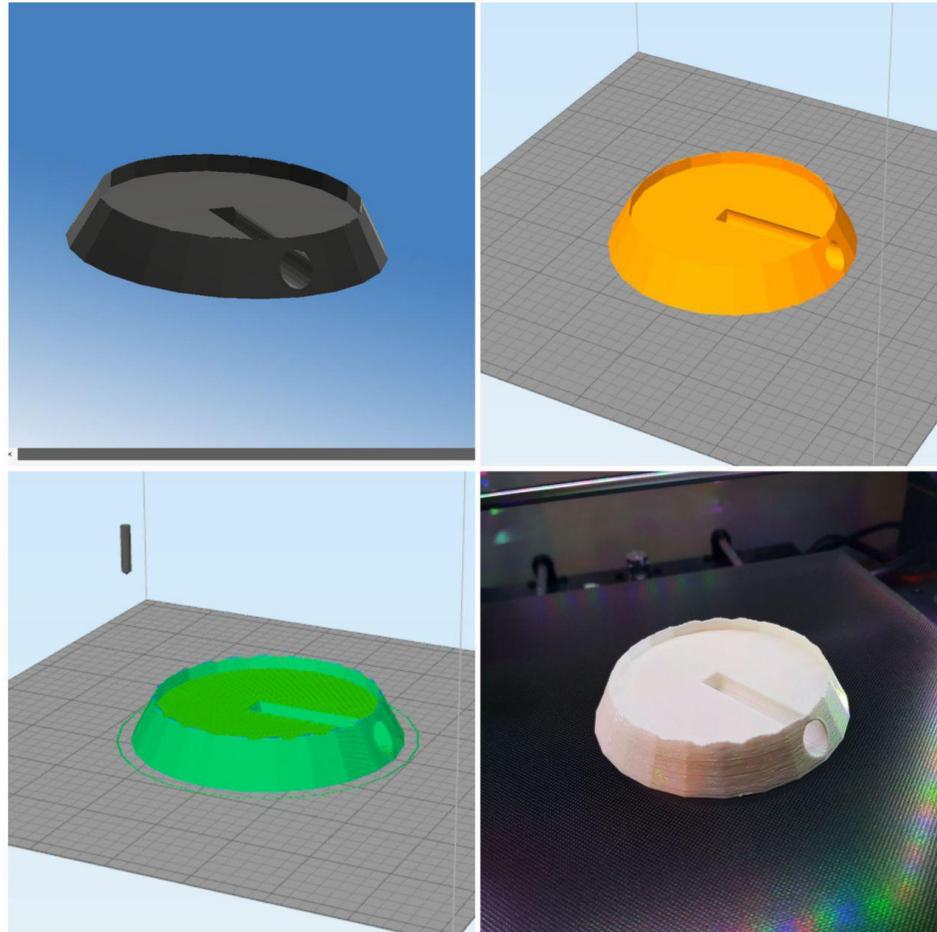


Figura 71: Diseño y construcción de la base

#### 7.4.4.3. Consola de control

Este componente será el más complicado de diseñar y de imprimir. El diseño es complejo, pues debe alojar varios componentes en su interior, tales como el Arduino y el Attiny con su correspondiente protoboard. A su vez, debe tener el espacio para albergar en la zona superior el joystick, que podrá conectarse al Arduino situado en su interior.

Vamos a distinguir tres partes claramente diferenciadas. En primer lugar la zona base. En ella estarán anclados tanto el Arduino como el Attiny en su adaptador, que a su vez estará colocado en una pequeña protoboard para realizar las conexiones necesarias.

Por otro lado tenemos la parte superior, en ella se realizarán unas inscripciones con el nombre del proyecto y del autor. Servirá de tapa de protección a los

componentes y, además, para alojar y sujetar el joystick y conseguir un diseño compacto.

Por último, se imprimirá una semiesfera para terminar de cubrir el joystick, dejando visible solamente la parte que permite la maniobrabilidad de este.

#### 7.4.4.4. Base inferior

En primer lugar realizaremos la toma de medidas de los componentes que alojará la consola. Con esas medidas se diseña una base que sirva de sujeción a todos ellos. El Arduino se fijará a la base mediante unos pines plásticos, que coincidirán con las perforaciones que tiene la placa del Arduino, mientras que la protoboard que lleva el microcontrolador ATtiny se sujetará mediante una cinta doble cara que lleva incorporada.

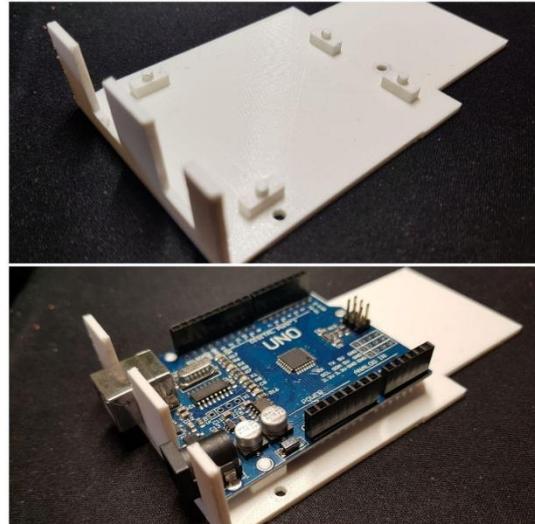


Figura 72: Base inferior

#### 7.4.4.5. Tapas superior

Será la cubierta superior, que debe cumplir con las cotas para que tengan cabida los elementos que se encuentran en el interior de la consola. El mayor problema en el momento de la impresión es que se trata de una pieza hueca, por lo que todo el interior debe imprimirse con material de relleno, pues sino todos los voladizos no serían imprimibles. Este motivo y la búsqueda de una definición media hacen que la duración de imprimir la pieza sea superior a las 6 horas.



Figura 73: Tapa superior

#### 7.4.4.6. Cúpula del Joystick

Constará de una semiesfera que acople a la perfección en la tapa superior, en los huecos destinados a ello. Además, tendrá unos huecos para la posterior sujeción mediante tornillos a la tapa.



Figura 74: Cúpula

### 7.5. SOLDADURA DE COMPONENTES

#### 7.5.1. Introducción

La técnica empleada será la soldadura con estaño, pues es, sin duda, la más empleada en aplicaciones electrónicas. Permite, de manera sencilla, la unión de uno o varios componentes de forma rápida y eficaz, formando una conexión física y eléctrica prácticamente perfecta. Sin embargo, es una técnica que requiere práctica, y ejecutarla correctamente es crítico, ya que una mala conexión puede provocar que no haya circulación eléctrica, y con ello el funcionamiento incorrecto del circuito.

Para ejecutarse correctamente, debe aplicarse el calor necesario en las partes a unir, de forma que al acercar el estaño, se funda sin problema. El soldador utilizado para estas aplicaciones no requiere gran potencia, más bien una alta inercia térmica.

El estaño utilizado, realmente no es solo eso, estaño. Se trata de una aleación, usualmente de estaño plomo, aunque puede contener otros componentes como cobre o plata. Dependiendo de la aleación variará la temperatura de fusión, pero repercutirá también en las propiedades eléctricas y mecánicas de la soldadura.

La mayor dificultad en las soldaduras del proyecto será realizar las soldaduras de componentes SMD con un soldador convencional. No obstante, utilizando correctamente el Flux y un estaño de calidad, podrá realizarse sin problema.

Una de las claves de un proyecto electrónico, son las comprobaciones puntuales. Esto es, ir construyendo y realizando las comprobaciones pertinentes por etapas. Es la manera correcta de proceder, pues en el caso de montar el circuito completo y no funcionar correctamente, sería mucho más complejo localizar la falla.

### 7.5.2. Placa de circuito impreso

A pesar de que nuestra placa original está diseñada para un montaje superficial, se han sustituido algunas resistencias por otras de un valor diferente a las que disponíamos. Por ello, algunas resistencias se montarán en superficie a pesar de estar prediseñadas para colocarse en un orificio pasante.

Por otro lado, el microcontrolador, como ya hemos comentado, no será colocado directamente en la placa. Para el conexionado soldaremos un cable en cada una de las patillas diseñadas a tal efecto en nuestro circuito, pudiendo así conectar el microcontrolador con su adaptador en una protoboard. Debido a la naturaleza de prototipo, es la mejor manera de poder reprogramarlo y realizar futuros cambios y comprobaciones.

Una vez soldados los cables a la placa, que harán las veces del microcontrolador, comprobaremos con un multímetro en posición de continuidad que todas las conexiones son correctas. Después, soldaremos una resistencia de base con su correspondiente transistor. Al tener el ATtiny de forma externa, podemos probar de forma aislada que, al aplicarle la tensión correspondiente en la base, el transistor actúa como un interruptor cerrado. Así, veremos si tenemos tensión en los bornes donde irá colocado el actuador de Nitinol.

Para poder observar el funcionamiento del Flexinol de una manera experimental, soldaremos dos cables donde irá situado finalmente, y conectamos los cables en una protoboard donde tendremos temporalmente el Nitinol, con el fin de estudiar su comportamiento.

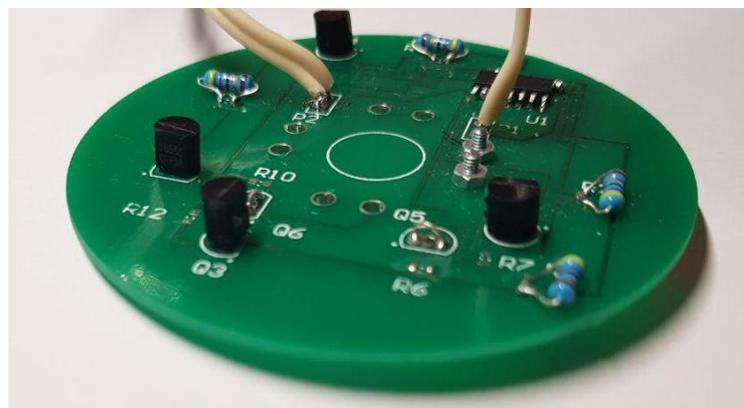


Figura 75: Placa de circuito impreso en proceso de soldadura

Una vez realizado ese paso, procedemos a la soldadura de los demás transistores y su resistencia de base, realizando las validaciones que se han comentado anteriormente. Finalmente aplicamos tensión con una fuente de alimentación externa en cada una de las bases de los transistores, si los cuatro



terminales donde irán situados los actuadores de Nitinol tienen tensión, significa que habremos concluido este apartado correctamente.

A continuación se programarán los microprocesadores para que proporcionen esa tensión que hemos aplicado directamente con una fuente de alimentación, con el fin de que efectúen correctamente la función de elevación de los actuadores.

## **7.6. PROGRAMACIÓN**

En la programación se procederá de un modo semejante a la soldadura de componentes. Es decir, programaremos por etapas y validando el funcionamiento de cada una de ellas antes de llevar a cabo la programación completa.

### **7.6.1. Arduino**

Recordamos que en nuestro proyecto el Arduino desempeñará el papel de Maestro, pero no efectuará directamente la activación de los actuadores. Sin embargo, debido a una mayor facilidad en la programación y el conexionado, trataremos en primera instancia de realizar el programa que controle los actuadores con el Arduino. La programación será muy similar, por lo que podremos adaptarla después al Attiny sin mayores complicaciones.

Será un programa sencillo, de activación y desactivación del Nitinol mediante un pulsador, con la frecuencia suficiente para no sobrecalentar los transistores. Después, este mismo programa lo adaptaremos a las bibliotecas del Attiny84. El programa completo puede encontrarse en el Anexo I.

### **7.6.2. ATiny84**

El siguiente paso será implementar el programa realizado para Arduino pero esta vez al microcontrolador ATtiny. Todavía no existirá ninguna comunicación, pues lo programaremos solamente para que active los actuadores de forma intermitente, sin recibir orden alguna del Arduino. Después, se establecerá la comunicación entre ambos microcontroladores, y la activación será realizada por el Esclavo, tras la orden del Maestro. El programa completo puede encontrarse en el Anexo I.

### **7.6.3. Comunicación $I^2C$**

Esta será la fase de mayor complejidad, aunque ya se explicó con detalle en el capítulo de Comunicaciones y Control. Al igual que en el resto del proyecto, comprobaremos el funcionamiento correcto de la comunicación con un ejercicio sencillo, e iremos incrementando la complejidad del programa hasta que realice la totalidad de las funciones.

En el primer ejercicio el Arduino, de ahora en adelante Maestro, le enviará un número cualquiera al ATtiny, que será el Esclavo. El Esclavo leerá el dato recibido y se lo devolverá al Maestro. Así, al mostrar por el puerto serial el número recibido por el Maestro, conoceremos el número que recibió el Esclavo, comprobando así que la comunicación ha resultado satisfactoria.

El siguiente programa consistirá en enviar la orden, por parte del Maestro, de que el Esclavo encienda una serie de luces LED, simulando ser los cuatro actuadores de cada módulo. Esta será la última comprobación antes del montaje final, pues si el microcontrolador logra seleccionar las luces a encender, de igual forma podrá regular qué transistor, con su correspondiente actuador, debe ser seleccionado.

Plantearemos el Esclavo de forma que la trama sea flexible para futuras configuraciones sin la necesidad de reprogramarlo. Es decir, el Esclavo solamente recibirá órdenes simples para activar uno o más actuadores, y será el Maestro el que realice las demás funciones. Se ha desarrollado de tal modo por la facilidad de reprogramación del Arduino y la dificultad de reprogramar el ATtiny.

Los programas mencionados pueden encontrarse en el Anexo I.

### 7.7. SECUENCIA DEL MONTAJE DE UN MÓDULO

Distinguiremos dos partes claramente diferenciadas en el montaje de nuestro robot. Por un lado se montará el módulo completo, y por otro la consola con los microcontroladores y el joystick.

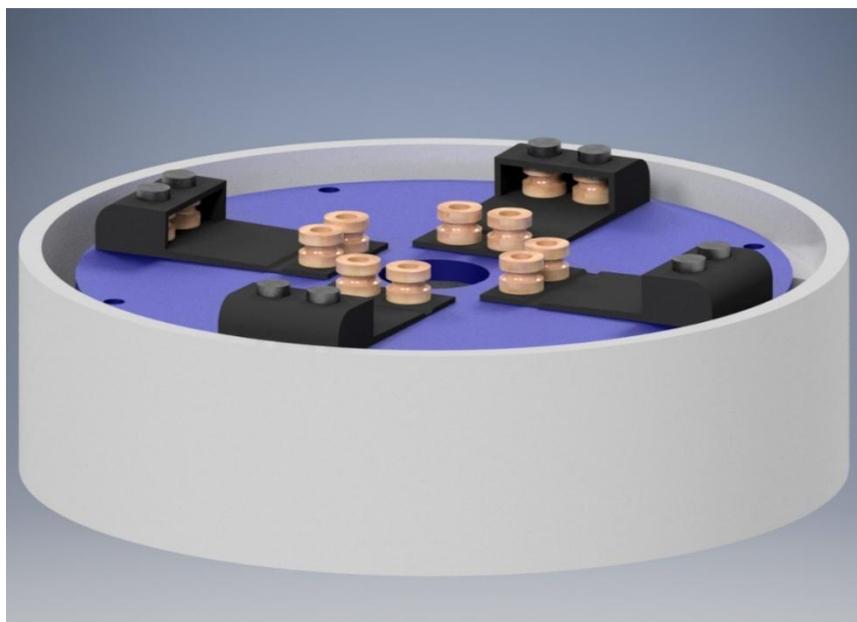


Figura 76: Módulo completo (Diseño 3D, Úbeda, R. 2018)

### 7.7.1. Módulo

Comenzaremos por el ensamblaje de los actuadores, que serán sujetos mediante dos tornillos de 1,6mm de diámetro. Se pondrá especial atención en que el cable de Nitinol, además de tener buen contacto con los bornes, tenga una correcta sujeción entre la tuerca del tornillo y la placa.

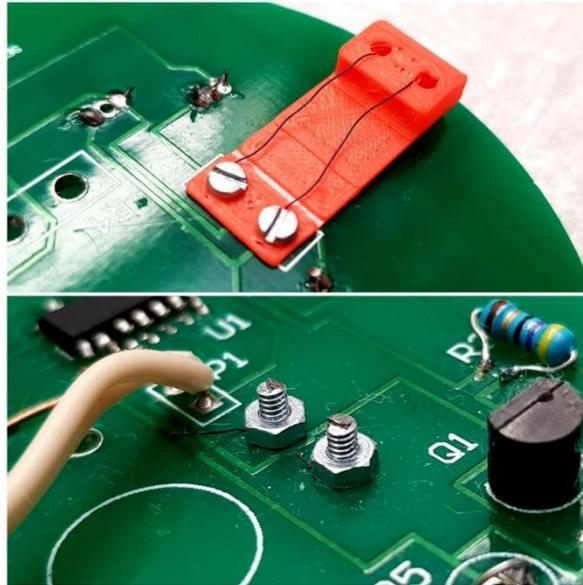


Figura 77: Ensamblaje del actuador

Es importante la tensión inicial del cable. Si el montaje tiene holgura, será más complicado después elevar el actuador, pues aunque la contracción será la misma, parte de ella se consumirá en pretensar el actuador. De igual forma procederemos a colocar los cuatro actuadores.

A continuación, fijaremos la placa con sus actuadores a la parte plástica del módulo. Para ello realizaremos tres orificios de 2mm de diámetro en el perímetro exterior, así, la unión se efectuará mediante tornillos, tal y como se muestra en la Figura 75.

Se prestará especial atención en la agrupación de cables a una sola manguera. Incorporaremos el mazo de cables a un tubo termo retráctil, de forma que el resultado sea lo más compacto y funcional posible. Los cables saldrán por debajo del módulo, en la abertura destinada a tal efecto. Por último, el módulo se colocará en la base diseñada para tal efecto, tal y como observamos en la

Figura 78.

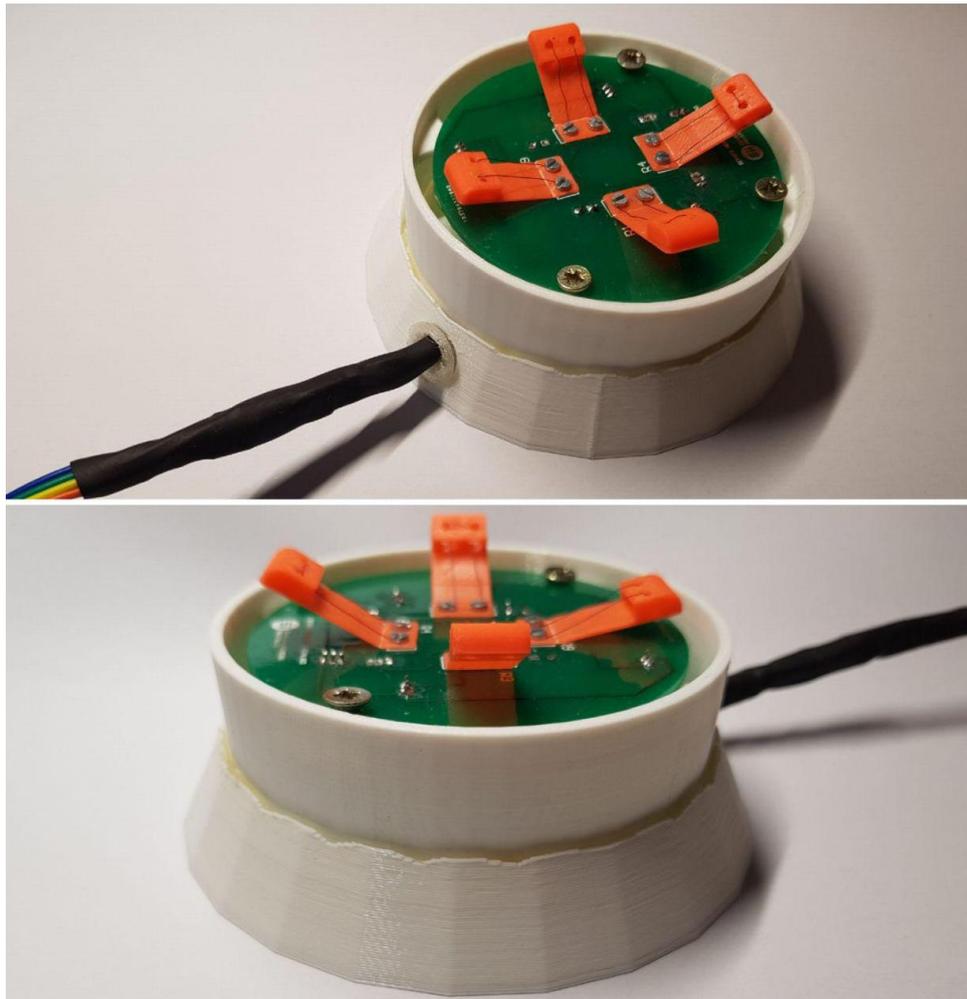


Figura 78: Módulo montado

### 7.7.2. Consola

Para ensamblar la consola de control, fijaremos todos los componentes a la base, exceptuando el joystick, que se situará en la parte superior. El Arduino posee unos pequeños orificios para ello, y se introducirán en los cilindros plásticos dispuestos en la base. La protoboard irá adherida junto a él.

Después fijaremos el joystick a la tapa superior, conectándolo al Arduino mediante una entrada que comunica el exterior de la tapa con el interior. Será imprescindible realizar una pequeña abertura para la extracción de los cables al exterior, tanto los de alimentación como los de datos.



Figura 79: Consola de control

Por último, se acoplará una cúpula en la parte superior que oculte la placa y el cableado del joystick.

#### **7.8. COMPROBACIÓN DEL PROTOTIPO**

Una vez finalizadas las dos partes principales del robot por separado, solo resta unir el bus de datos, conectar la fuente de alimentación y comprobar el funcionamiento.

Para comenzar a controlar el robot, una vez conectada la fuente de alimentación a la corriente, accionaremos el interruptor situado en la Consola de Control. Se encenderá un LED que indicará que el Robot está alimentado.

A continuación conectamos la consola al PC, donde podremos observar que las órdenes que enviamos son las ejecutadas. Bastará con comenzar a mover el joystick o dar comandos a través del PC para que el robot comience su movimiento.

#### **7.9. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y SOLUCIONES ADOPTADAS**

En este apartado se refleja una relación de los problemas que hemos encontrado en la ejecución del prototipo, así como las soluciones que pueden llevarse a cabo para solucionarlo.



### **7.9.1. Nitinol: Longitud del Cable**

La primera dificultad que nos encontramos fue la variación de prácticamente todos los parámetros del circuito con respecto al tamaño del cable de Nitinol. Dependiendo de la longitud de este varía la resistencia y, por tanto, la corriente suministrada para lograr incrementar su temperatura también variará. Aunque este apartado se describió con detalle en el capítulo sobre el actuador de Nitinol, se ha creído conveniente remarcarlo en este capítulo de consideraciones constructivas. Esto será de vital importancia y deberá tenerse en cuenta, tanto en el presente prototipo como en futuros posibles desarrollos.

### **7.9.2. Dimensionado de componentes: Transistores**

Como se ha comentado anteriormente, los transistores elegidos no son efectivos en las corrientes que estamos trabajando. Superan su corriente máxima establecida por el fabricante, y por ello elevan su temperatura llegando a provocar fallas. Es más, si se supera un tiempo determinado de funcionamiento, estos pueden abrirse permanentemente, quedando completamente inservibles. Sería necesario optar por otro tipo de transistores si se desea trabajar con este tipo de actuadores.

En nuestro caso, al tratarse de un prototipo no es un problema crucial, bastará con no superar más de 10 segundos la actuación en las comprobaciones.

### **7.9.3. Disipación de temperatura**

Otro parámetro que ha variado en la construcción del prototipo final ha sido la corriente a circular por el Nitinol. Debido a que los anclajes del actuador son tornillos metálicos, disipan calor y aumentan la resistencia. Por ello, se aplicará toda la tensión que nos proporciona la fuente de alimentación, prescindiendo incluso de la modulación por ancho de pulso, ya que tendríamos que aplicar todo el pulso de forma continua. De igual forma, el sistema solo debe estar activado unos segundos por lo tratado en el apartado anterior.

### **7.9.4. Tensar actuadores**

En la primera prueba que se ha realizado sobre el módulo completamente montado se ha observado que apenas podían elevarse los actuadores, mucho menos añadiendo un ligero peso en la parte superior.

Esto se ha solucionado pretensando los cables de Nitinol en los actuadores, de forma que ya posean una ligera elevación antes de contraerse. Si el actuador se encontraba completamente en reposo, el Flexinol presentaba ciertas ondulaciones, y eso se traducía en un ligero porcentaje de contracción perdido.



#### **7.9.5. Reset del ATtiny84**

Este se trata de uno de los problemas que más tiempo ha llevado, tanto en el descubrimiento como en la solución. El ATtiny posee un pin de RESET, en concreto la patilla física número 4. El problema radica en que, en los diseños anteriores, esta patilla se utiliza como una de las salidas para activar los actuadores. La consecuencia es, que al tener tensión en esa patilla, el controlador ejecutaba un RESET continuo, impidiendo el funcionamiento del sistema. Esto no significa que la utilización del pin número 4 no pueda actuar como salida, pero se debe tener en cuenta una serie de consideraciones para ello.

Si programamos el microcontrolador de forma que se anule ese RESET interno y actúe como salida, el chip no puede volver a ser reprogramado, al menos con el método que se ha utilizado en este trabajo. El RESET se utiliza en el proceso de programación, por ello, al quedar inservible, solo podría ser reprogramado con un programador AVR de alto voltaje. La solución se ha traducido en cambiar la salida al pin 6, al tener el ATtiny conectado de forma externa y no soldado a la placa, el cambio ha resultado sencillo.

#### **7.9.6. Activación simultánea de actuadores**

Tal y como se ha descrito en el capítulo del movimiento del robot, la propuesta inicial se traducía en accionar los actuadores dos a dos, de forma que al activarse un movimiento, se elevasen dos actuadores consecutivos simultáneamente. Además, se pretendía implantar un sistema para elevar el robot sin producir el giro, el cual se lograría efectuando la activación de los cuatro actuadores al mismo tiempo. El problema en la ejecución de ambos casos ha sido el mismo, y se detalla a continuación.

Los cuatro actuadores se encuentran en paralelo, y por tanto la corriente se divide entre los cuatro cables de Nitinol. Si uno o varios actuadores tienen una resistencia distinta a los demás, la corriente que circule por ellos será también diferente, y por ende, la temperatura. Esto repercutirá en que la elevación de los actuadores no será equitativa. Para lograr un funcionamiento correcto, se deberían equilibrar perfectamente todos los actuadores, tanto en la resistencia eléctrica como en el esfuerzo que requieran para elevarse. Además, la fuente de alimentación es limitada, y solo suministra la corriente necesaria para un actuador. Esto tendría una solución sencilla, bastaría con sustituirla por una de más potencia, evaluando de nuevo el efecto de la temperatura de los cables de Nitinol.





# Capítulo 8. Conclusiones, mejoras propuestas y futuros desarrollos



### 8.1. CONCLUSIONES:

El ámbito de la medicina se encuentra en continuo avance y crecimiento, tratando de aplicar de forma segura todos aquellos progresos tecnológicos y científicos que desarrolla nuestra sociedad. Día a día aparecen nuevas técnicas que ayudan en la detección, tratamiento y control de diversas alteraciones que afectan al ser humano. Podemos observar en el ámbito de la cirugía como, siempre que es posible, se opta por una cirugía mínimamente invasiva.

Un amplio abanico de enfermedades puede tratarse de manera eficaz con una detección precoz, por lo que la detección es uno de los campos de la medicina en los que más se invierte en investigación. Por ello, el campo de estudio que nos ocupa, buscamos una herramienta para la detección de trastornos gastrointestinales poco invasiva, que no provoque daño alguno a los tejidos interiores. Un robot guiado que pueda ser controlado exteriormente y que a su vez pueda visualizarse su recorrido a través de una cámara. Partiendo de estas premisas, se ha decidido investigar en el diseño y construcción de un robot ápodo, la elección de esta forma se debe a la extrapolación del mundo animal. Los animales ápodos pueden desplazarse por lugares estrechos y de gran complejidad sin muchos problemas, llegando incluso a ocupar parte del cuerpo de otros animales sin causar grandes trastornos.

Para ello, se ha construido y programado un prototipo funcional de un robot ápodo hiper redundante que, en un futuro, podría ser la base de un robot final que cooperase en la detección de enfermedades, así como en un futuro tratamiento. Deberá poseer más ventajas y menos contraindicaciones que los métodos utilizados en la actualidad, y será una técnica más rápida y eficaz en la ejecución de la prueba. Gracias a desarrollos como este, con el paso del tiempo aparecen nuevos métodos de diagnóstico más eficaces, indoloros y rápidos.

Se han analizado las propiedades que debe cumplir y los materiales que pueden ser utilizados en un primer prototipo. Existen prototipos similares al que se ha realizado, pero la utilización del Nitinol ha sido un punto diferencial, que ofrece unas capacidades en relación con su tamaño que otras formas de actuación no ofrecen. Es el motivo por el cual se le ha dedicado una parte importante de tiempo en este trabajo, tratando de describir, experimentar y aprovechar todas las características innatas a este material.

Un aspecto importante ha sido realizar un diseño y una programación que, más adelante, pueda reutilizado y miniaturizado, y todos los componentes que hemos utilizado podrán colocarse sin complicaciones en un encapsulado mucho más pequeño.



En la elaboración de este trabajo han existido tres etapas claramente identificables:

- Recopilación de toda la información que se ha generado hasta el momento sobre este robot, tanto de materiales como de cuestiones cinemáticas y dinámicas del robot, pasando por la elección de mecanismos de actuación.

Para ello se han estudiado detenidamente los Trabajos y Tesis desarrollados alrededor de este tema, proyectos que habremos mencionado a lo largo de todo el informe.

- Mejoras sobre las ideas iniciales, realizando un nuevo diseño del circuito electrónico y modificando y creando nuevos diseños para la construcción del prototipo. Se han realizado pruebas y ensayos aislados y controlados, que han ido probando todos los apartados que se han desarrollado.
- Construcción real de un primer prototipo, que constará de un solo módulo funcional, pero que ayudará a comprender el funcionamiento y las complicaciones que pueden encontrarse en un futuro. Además, se han elaborado una serie de programas para el correcto funcionamiento del módulo, pudiendo ser fácilmente entendibles y modificables para poder utilizarse en un futuro.

No obstante, todo esto es sólo el inicio de lo que podría llegar a ser un robot semejante al que hemos tratado a lo largo de todo este proyecto. Por ello, es verdaderamente importante plantear unas líneas futuras de investigación, que continúen y mejoren todo lo propuesto hasta el momento.



## 8.2. MEJORAS PROPUESTAS Y FUTUROS DESARROLLOS

- **Rediseñar con Flexinol de mayor diámetro:** Siendo el próximo objetivo la miniaturización del robot, con el fin de poder utilizarse en el campo para el que fue diseñado, se deben estudiar, sobre todo, los actuadores. Un punto interesante sería rediseñar completamente el circuito, con el fin de soportar corrientes más elevadas y poder alojar cable de Nitinol de un diámetro mayor. El mayor inconveniente de esto sería no superar unos valores que puedan ser peligrosos para el cuerpo humano.
- **Cobertura exterior:** El robot debe estar recubierto por una película elástica, que sea biocompatible y que sea lo suficientemente flexible para no limitar los movimientos del robot. No obstante, esto será realmente necesario cuando el robot sea miniaturizado y, por ello, deba ser completamente inocuo al cuerpo humano.
- **Robot autónomo:** Es conveniente estudiar el modo de acoplar una micro cámara en el último módulo, con el fin de observar y analizar el camino que recorre el robot. Además, este punto podría estar relacionado con un robot autónomo. Sería interesante desarrollar el robot de forma que pudiese desplazarse de forma autónoma, y que no sea necesario que el personal médico que realice la prueba tenga conocimientos de manejo del robot. De este modo el médico solo debería indicar la zona a reconocer.  
Para que el robot pudiese tener una autonomía real, sería necesario incluir una comunicación inalámbrica, así como una alimentación con baterías que permitan un determinado tiempo de actuación.
- **Sensorización:** Uno de los principales objetivos de futuro, era poder controlar la actuación del Nitinol en Lazo Cerrado. Esto podría realizarse de forma sencilla añadiendo algún tipo de sensor al robot, sin embargo, sería realmente complicado hacerlo en el modelo ya miniaturizado. Explorando otras vías, existen estudios que afirman que la resistencia del Flexinol varía con la temperatura. Esto se debe a una diferencia de resistencia de un 20% entre la Martensita y la Austenita, que son las dos fases que atraviesa el Nitinol en el proceso de cambio de temperatura. Con ello, se podría llegar a determinar la posición del actuador estableciendo una relación entre temperatura y resistencia. Conociendo la longitud del cable a una temperatura, podemos conocerla a otra temperatura determinada.



- **Software interfaz:** Sería adecuado desarrollar un software con un entorno gráfico, que permita controlar distintos parámetros y observar y manejar el robot de una forma más eficaz. Podría contener una ventana de control junto a la imagen de la cámara mencionada anteriormente.
- **Miniaturización:** Por último, y probablemente el apartado que reviste mayor importancia y complejidad, es desarrollar el sistema de forma que pueda ser miniaturizado hasta el tamaño que deseamos. El circuito electrónico no debería ser un problema, ya que los componentes no ocupan un gran tamaño. Los actuadores no son más que un fragmento de Nitinol, que pueden colocarse de la longitud que se estipule, con el previo rediseño del circuito.





# Capítulo 9. Bibliografía



- Latarjet, R. L. Ruiz Liard, A. (2006): “*Anatomía Humana*”, Editorial Médica Panamericana, Buenos Aires [págs.1221-1507].
- Hernando Regalado, S. (2018): “Diseño y construcción de un prototipo de Robot Ápodo Modular e Hiper-redundante”, Valladolid, España.
- González Gómez, J. (2002): “*Principales líneas de investigación en robots receptores tipo ápodos*”.
- Madrugá Laguna, S. (2015): “Análisis de tecnologías y materiales para el diseño de un Robot Ápodo, Modular e Hiper-redundante”, Valladolid, España.
- Martínez Martín, C. (2017): “Desarrollo de un Robot Manipulador Blando e Hiper-redundante”, Madrid, España.
- Álvarez García, J. (2019): “*Estrategias de seguimiento de trayectorias y determinación de velocidades de un manipulador BHR*”, Valladolid, España.
- Saldaña Ruiz de Villa, L. (2017): “*Sistema de control y alimentación para un robot ápodo modular e hiper-redundante*”, Valladolid, España.
- Sitalán Ovalles, J.L. (2016): “*Anatomía y fisiología de esófago y estómago y otras patologías*”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en:  
<https://jorgesitalan.wordpress.com/2017/10/16/anatomia-y-fisiologia-de-esofago-y-estomago-y-otras-patologias/>
- Sociedad Española de Endoscopia Digestiva (2018): “*Endoscopia Digestiva básica*”. Última vez visitado: octubre 2019. Disponible en:  
[https://www.wseed.org/images/site/SEED\\_Programa\\_Formaci%C3%B3n\\_MIR\\_Aparato\\_Digestivo.pdf](https://www.wseed.org/images/site/SEED_Programa_Formaci%C3%B3n_MIR_Aparato_Digestivo.pdf)



- Instituto Nacional del Cáncer (2014): “*Diccionario del Cáncer*”. Última vez visitado: octubre 2019. Disponible en: <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario>
- American Society of Clinical Oncology (ASCO) (2017): “*Tipos de endoscopia*”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en: <https://www.cancer.net/es/desplazarse-por-atenci%C3%B3n-del-c%C3%A1ncer/diagn%C3%B3stico-de-c%C3%A1ncer/pruebas-y-procedimientos/tipos-de-endoscopia>
- National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases (2018): “*El aparato digestivo y su funcionamiento*”. Última vez visitado: octubre 2019. Disponible en: <https://www.niddk.nih.gov/health-information/informacion-de-la-salud/enfermedades-digestivas/aparato-digestivo-funcionamiento>
- Miller, Gavin (2000):” Snake Robots”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en: <http://www.snakerobots.com/>
- Anderson, Victor C. (1968): “*Scripps Benthic Lab Tensor Arm*”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en: <http://cyberneticzoo.com/underwater-robotics/1968-scripps-benthic-lab-tensor-arm-victor-c-anderson-american/>
- Choset, Howie (2013): “*Modular Snake Robots*”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en: <http://biorobotics.ri.cmu.edu/projects/modsnake/>
- Liu, Jinguo:” *Current research, key performances and future development of search and rescue robot*”. Última vez visitado: octubre 2019. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/239417125\\_CURRENT\\_RESEARCH\\_KEY\\_PERFORMANCES\\_AND\\_FUTURE\\_DEVELOPMENT\\_OF\\_SEARCH\\_AND\\_RESCUE\\_ROBOT](https://www.researchgate.net/publication/239417125_CURRENT_RESEARCH_KEY_PERFORMANCES_AND_FUTURE_DEVELOPMENT_OF_SEARCH_AND_RESCUE_ROBOT)



- Makers of Dynamic Alloys – Dynalloy: “*Flexinol Actuator Wire technical and design data*”. Última vez visitado: mayo 2019. Disponible en: [https://www.dynalloy.com/tech\\_data\\_wire.php](https://www.dynalloy.com/tech_data_wire.php)
- Arnedo, Agustín: “*Materiales con memoria de forma: el Nitinol*”. Última vez visitado: junio 2019. Disponible en: [https://www.seas.es/blog/disenio\\_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/](https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/)
- Ward Rottiers, Lauren Van den Broeck, Chris Peeters, EWE, Peter Arras: “*Shape Memory Materials and their applications*”. Malinas, Bélgica.
- Jameco Electronics: “*What are Muscle Wires?*”. Última vez visitado: mayo 2019. Disponible en: <https://www.jameco.com/Jameco/workshop/Howitworks/how-muscle-wire-works.html>
- Antonio – Divulgadores.com (2016): “*Nitinol, un material con memoria de forma*”. Última vez visitado: junio 2019. Disponible en: <https://divulgadores.com/nitinol-un-material-con-memoria-de-forma/>
- Heymsfeld, Ralph: “*Precision Flexinol position control using Arduino*”. Última vez visitado: agosto 2019. Disponible en: <http://robotics.hobbizine.com/flexinolresist.html>
- Varios autores: “*Installation & Troubleshooting, Tutorials, Microcontrollers*”. Última vez visitado: agosto 2019. Disponible en: <https://forum.arduino.cc/index.php>
- Konde, Spence (2019): “*Arduino Core for Attiny 1634, 828, x313, x4, x41, x5, x61, x7 and x8*”. Última vez visitado: Julio 2019. Disponible en: <https://github.com/SpenceKonde/ATTinyCore>
- Alfieri, Mauro: “*Attiny85 slave ADC i2C joystick switch*”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en: <https://www.mauroalfieri.it/elettronica>
- Ferro, R. (2018): “*Conecta un joystick analógico a Arduino en 3 simples pasos*”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en: <https://rodolfoferro.xyz/>



- Llamas, Luis (2016): “*El bus I2C en Arduino*”. Última vez visitado: agosto 2019. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/arduino-i2c/>
- Llamas, Luis (2016): “*Controla tus proyectos con arduino y joystick analógico*”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/arduino-joystick/>
- Llamas, Luis (2016): “*El bus SPI en Arduino*”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/arduino-spi/>
- Llamas, Luis (2016): “*Actuador electromagnético lineal con Arduino*”. Última vez visitado: junio 2019. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/arduino-actuador-electromagnetico/>
- Technoblogy (2014): “*Four PWM Outputs from the Attiny85*”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en: <http://www.technoblogy.com/show?LE0>
- Profesor Molina: “*Iniciación a la soldadura con estaño*”. Última vez visitado: mayo 2019. Disponible en: <http://www.profesormolina.com.ar/electronica/soldadura/soldadura.htm>
- Baelza, Bubba: “*ATTiny84 – I2C Slave – Arduino UNO*”. Última vez visitado: Julio 2019. Disponible en: <https://www.instructables.com/id/ATTiny84-I2C-Slave-Arduino-UNO/>
- Tsant: “*Arduino Uno to Program Attiny84*”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en: <https://www.instructables.com/id/Arduino-Uno-to-Program-ATTINY84-Arduino-V-185/>
- JouleTime: “*ATtiny85 & Attiny84 Analog Pins, Serial Communication, Etc*”. Última vez visitado: septiembre 2019. Disponible en: <https://www.instructables.com/id/ATtiny85-ATtiny84-Analog-Pins-Serial-Communication/>