



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es

Elena Muñoz Sánchez

05 TRABAJO FIN DE GRADO

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN ROBOT CONTINUO DE CABLES CON DISCOS PIVOTANTES

FEBRERO 2022

Elena Muñoz Sánchez

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:

Antonio Barrientos Cruz

TRABAJO FIN DE GRADO PARA
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



POLITÉCNICA

“Más vale tarde que nunca”

“Algún día diré: No fue fácil, pero lo logré”

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia su apoyo y amor incondicional durante estos largos años. Sin vosotros no estaría donde estoy ni habría llegado a ser quien soy ahora.

A mi tutor, Antonio, por creer en mí a lo largo de todo el proyecto más que yo misma, y apoyarme en todas las dudas e impedimentos que me he ido encontrando.

A mis dos grandes mentores, Iván y David, por mostrarme este proyecto y guiarme siempre que lo he necesitado.

A mi compañero Jaime, por ayudarme a materializar el *Pylori-I* y aguantarme en los peores momentos.

A la asociación de estudiantes RESET, por todo lo que me ha aportado estos últimos años, tanto académica como profesionalmente.

Y a todos los que me habéis acompañado durante esta etapa, en especial a La Taca, a Laura y a Elisa, por compartir esta aventura y levantarme siempre que me caía.

RESUMEN

Los robots híper-redundantes son aquellos que poseen un gran número de grados de libertad en comparación con los robots convencionales. La complejidad de su diseño y de su control hacen que su uso no sea tan frecuente como el de los robots no redundantes. Sin embargo, en determinadas aplicaciones, como por ejemplo aquellos casos en los que se hace necesario un elevado grado de maniobrabilidad para trabajar en espacios muy confinados, su uso es casi imprescindible.

El uso de robots híper-redundantes permite resolver con éxito ciertas tareas de inspección o incluso mantenimiento en entornos industriales, aeroespacial, seguridad y vigilancia, y medicina, que serían inabordables con cinemáticas de robots más convencionales.

En este proyecto, se ha diseñado y construido el robot llamado *Pylori-I*. Se trata de un manipulador continuo híper-redundante que consta de 16 grados de libertad (GdL) distribuidos de cuatro en cuatro a lo largo de sus cuatro secciones. Tiene una longitud de 260 mm a los que se suman otros 48 mm del distribuidor de cables y 155 mm del banco de motores, haciendo un total de 463 mm. La estructura está formada por discos impresos en 3D que pivotan unos sobre otros siguiendo la construcción de robots con *twin-pivot compliant joints* (TPCJ) y que son accionados mediante motores paso a paso con transmisión por cables.

En su desarrollo, se ha partido del robot desarrollado por Iván Rodríguez en su Trabajo de Fin de Máster [1] y del diseño de endoscopios médicos [2], rediseñando y modificando determinados aspectos para poder llevar a cabo su materialización.

Se trata de un diseño innovador que busca prescindir del empleo del denominado *backbone* o núcleo central con el que cuentan la mayor parte de los robots híper-redundantes, liberando así el espacio central del robot y aligerando su peso, sin perder sus capacidades de maniobrabilidad que le dotan de gran versatilidad y flexibilidad.

Con este robot se pretende realizar tareas que requieran accesos complicados para el ser humano, como la inspección o el mantenimiento en el interior de máquinas o tuberías, o que sean peligrosas, como la inspección de lugares donde puedan ocultarse explosivos u otro tipo de amenazas. Otra de las principales aplicaciones buscadas, es su empleo en la medicina debido a su pequeño diámetro, lo cual permitiría también realizar inspecciones visuales si se redujera más su tamaño, comportándose como un endoscopio.

Durante el desarrollo del trabajo, se ha realizado un primer estudio del movimiento del robot en Matlab, obteniendo una simulación precisa de su comportamiento. Se han implementado nuevas restricciones, detección de colisiones, cálculo de trayectorias y del espacio de trabajo y estimación de las elongaciones necesarias para los cables. Tras ello, se han rediseñado y fabricado los elementos constitutivos del robot y se ha procedido a su montaje, manteniendo requisitos de posible reconfiguración. Se ha puesto en marcha el sistema de accionamiento basado en motores paso a paso (PaP) y su control mediante Arduino. También se ha diseñado un sistema de calibración y medida buscando facilitar estas tareas habitualmente problemáticas en los robots de cables. Finalmente, se han llevado a cabo una serie de experimentos para evaluar la calidad de su posicionamiento.

Los experimentos realizados han permitido obtener una serie de conclusiones y detectar posibles futuras líneas de investigación.

Se espera que este robot suponga un avance en el campo de la robótica híper-redundante y continua que utiliza *TPCJ*.

ABSTRACT

Hyper-redundant robots are those that have many more degrees of freedom compared to conventional robots. The complexity of its design and control means that its use is not as frequent as that of non-redundant robots, but in certain applications, such as those cases in which a high degree of manoeuvrability is necessary to work in very small spaces, its use is almost essential.

The use of hyper-redundant robots makes it possible to successfully solve certain inspection or even maintenance tasks in industrial, aerospace, security and surveillance, and medical environments, which would be intractable with conventional robot kinematics.

In this project, a robot named *Pylori-I* has been designed and built. It is a hyper-redundant continuous manipulator consisting of 16 degrees of freedom (DoFs) distributed four by four along its four sections. It has a length of 260 mm to which another 48 mm of the cable distributor and 155 mm of the engine bank are added, making a total of 463 mm. The structure is made up of 3D printed disks that pivot on each other following the construction of robots with twin-pivot compliant joints (TPCJ), and that are driven by stepper motors with cable transmission.

In its development, it has been based on the robot developed by Iván Rodríguez in his master's Thesis [1] and the design of medical endoscopes [2], redesigning and modifying certain aspects in order to carry out its materialization.

It is an innovative design that seeks to dispense with the use of the so-called backbone or central core that most hyper-redundant robots have, thus freeing up the central space of the robot and lightening its weight, without losing its manoeuvrability capabilities, which give great versatility and flexibility.

This robot is intended to perform tasks that require difficult access for humans, such as inspection or maintenance inside machines or pipes, or that are dangerous, such as inspection of places where explosives or other types of threats may be hidden. Another of the main applications sought is its use in medicine due to its small diameter, which would also allow visual inspections if its size were further reduced, behaving like an endoscope.

During the development of the project, a first study of the robot's movement has been carried out in Matlab, obtaining an accurate simulation of its behaviour. New restrictions, collision detection, calculation of trajectories and workspaces, and estimation of the necessary elongations for the cables have been implemented. Later, the constituent elements of the robot have been redesigned and manufactured and its assembly has proceeded, maintaining the possible reconfiguration requirements. The drive system based on stepper motors (PaP) and its control through Arduino have been launched. A calibration and measurement system has been designed, seeking to facilitate these tasks, which are usually problematic in driven tendons robots. Finally, a series of experiments have been carried out to evaluate the quality of its positioning.

The experiments carried out have made possible to obtain a series of conclusions and to detect possible future lines of research.

This robot is expected to be a breakthrough in the field of hyper-redundant and continuous robotics using TPCJ.

RESUMEN EJECUTIVO

Actualmente, se puede encontrar una gran variedad de tipos de robots, pero en este trabajo se estudiará el caso del *Pylori-I*, un robot híper-redundante, continuo y blando construido mediante discos pivotantes y accionado por cables y motores paso a paso.

Un robot híper-redundante es aquel que posee un número de grados de libertad igual o superior al doble del número de dimensiones del espacio de trabajo. De esta manera, este tipo de robots están dotados de una flexibilidad y maniobrabilidad mayores que las de los robots convencionales.



Ilustración 1. Prototipo de robot continuo e híper-redundante. Fuente:
<http://www.ccad.uiowa.edu/sites/www.ccad.uiowa.edu.vsr/files/files/Continuum-Robot-AR.pdf>

Los robots de tipo continuo son aquellos que no están formados por uniones rígidas, lo cual provoca que el robot se deforme de manera continuada y natural, de ahí su nombre.

En el caso de los robots de tipo blando (*soft robots*), se denominan de esta manera debido a que los materiales que los componen no generan una estructura rígida que pueda causar daños en su entorno. Es por ello por lo que pueden emplearse como robots colaborativos o instrumentos médicos.

A pesar de que una de las funcionalidades principales de los robots híper-redundantes es la inspección visual de zonas poco accesibles, este trabajo se ha centrado en el desarrollo de un robot que se asemeje a un endoscopio y que permita su aplicación en áreas de la cirugía poco invasiva en distintas especialidades médicas y quirúrgicas.

Para el diseño del *Pylori-I* se han comparado diferentes prototipos estudiados previamente en el Centro de Automática y Robótica, como el *Kyma* o el *MACH-I*. Finalmente, se ha decidido implementar el método de construcción que emplea *twin-pivot compliant joints*.

Para su construcción, se han impreso en 3D la mayor parte de los componentes con la colaboración de la asociación de estudiantes RESET. Los motores e hilos se han tenido que comprar externamente.

Para la colocación del robot en posición horizontal, se ha diseñado un soporte *ad hoc* adaptado a los espacios libres que dejan los motores.



Ilustración 2. Pylori-I conectado al armario eléctrico y colocado horizontalmente sobre el soporte

La actuación mediante cables se ha dividido en dos fases que utilizan un tipo de cable diferente. Aunque ambos son hilos de pesca, el más grueso se colocará en la polea, ya que va a ser el cable que más sufra de los dos, enrollándose y desarrollándose continuamente. Además, el banco de motores es extrínseco al cuerpo del robot, por lo que aligerará en gran medida el peso del brazo robótico.



Ilustración 3. Cables usados para la actuación. Fuente: <https://www.amazon.es/>

En cuanto a la construcción del brazo robótico, la estructura está formada por apilamientos de discos que forman secciones siguiendo una distribución 20-12-12-8 partiendo desde la base.

Cada una de las secciones tiene como disco final una modificación de los anteriores para poder alojar el final de los cables en su cara lateral. Además, estas secciones se encuentran desfasadas $2\pi/16$ radianes entre sí y están actuadas cada una de ellas por cuatro cables diametralmente opuestos dos a dos.

Esta configuración de los cables ha sido estudiada en el trabajo, resultando ser la que menores tensiones genera.

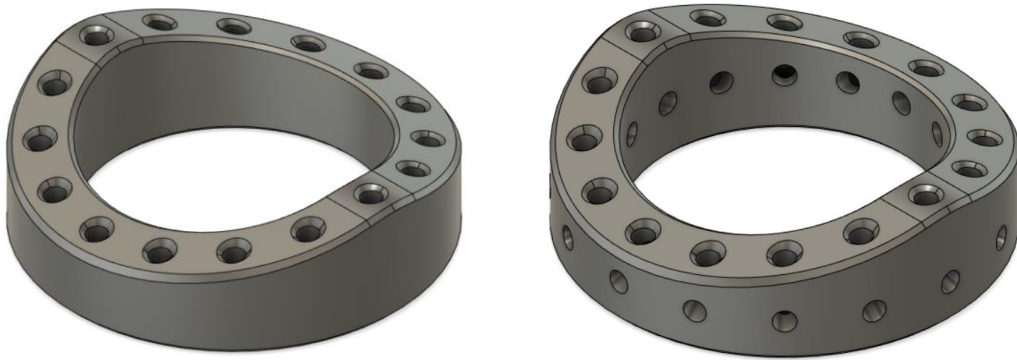


Ilustración 4. Discos utilizados en la construcción de las secciones

En total, se obtienen 16 grados de libertad para todo el robot, cuatro por sección, quedando como diseño final el siguiente:

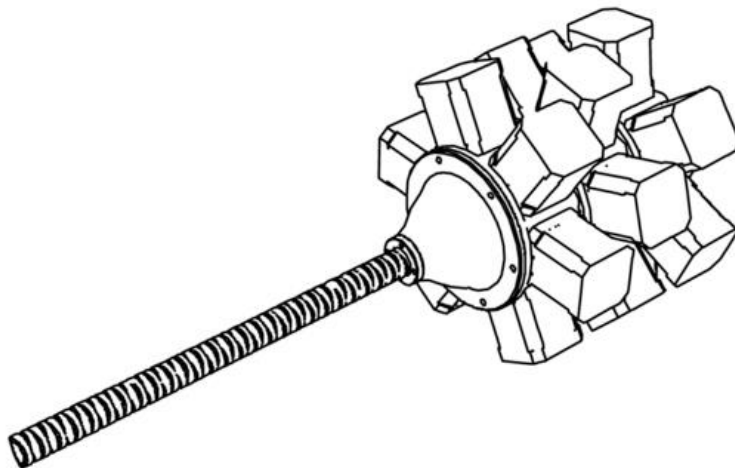


Ilustración 5. Diseño final del Pylori-I realizado con Catia V5

En cuanto al control cinemático del robot, se ha hecho un estudio y comparación de tres cinemáticas existentes, descartando aquellas que utilizan el método de cálculo de la matriz Jacobiana.

Una vez determinado cómo se va a generar el movimiento del *Pylori-I*, se han implementado nuevos métodos y funciones en Matlab que serán utilizados para el posicionamiento del extremo, la generación de trayectorias, la detección de colisiones, el cálculo de las elongaciones de cada uno de los cables y la estimación de las dimensiones del espacio de trabajo.

También mediante Matlab, se ha creado una interfaz hombre-máquina dentro de la cual se podrá activar la conexión Matlab-Arduino, ver el número total de colisiones ocasionadas y los discos implicados en las mismas y, lo más importante, introducir coordenadas que generen la simulación de posicionamiento del extremo.

Esta interfaz también mostrará la posición real en la que se ha situado el *Tool Center Point* y el error generado en el posicionamiento.

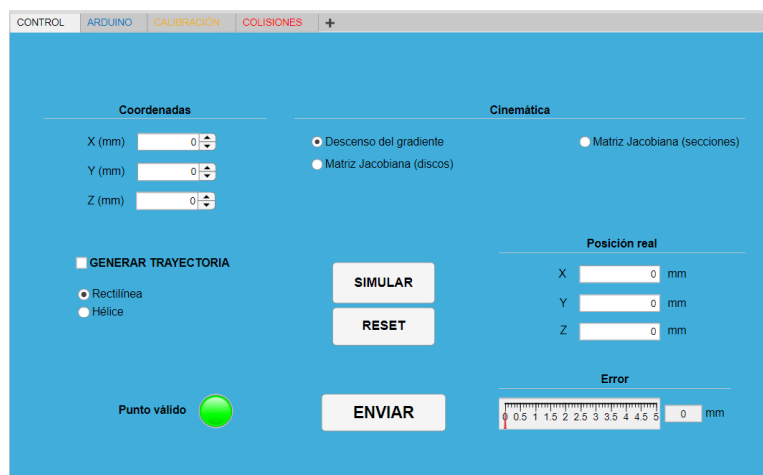


Ilustración 6. Pantalla principal de la interfaz

En lo referido al hardware de control, se han utilizado motores paso a paso NEMA17 cuyo conexionado se ha realizado a través de un armario eléctrico proporcionado por el Centro de Automática y Robótica.

Este armario está compuesto por 18 drivers de tipo *TB6600* y un *Arduino Due*. Las dos conexiones sobrantes del armario permitirán en un futuro conectar motores que se encarguen del manejo de una herramienta colocada en el extremo del robot.

Los drivers están configurados para que cada motor de 200 pasos/rev tenga un *microstepping* que los transforme en 1600 pulsos por revolución.

Una vez iniciado el *puerto Serial* de Arduino, se enviarán a la placa los pulsos calculados por Matlab para cada uno de los motores siguiendo esta sintaxis:

[Motor;Comando;Arg1;Arg2;]

Para la realización de experimentos se ha construido un espacio físico de trabajo para poder realizar medidas de calibración y de posicionamiento.

El conjunto del espacio de trabajo está formado por perfiles de aluminio, carros V-Slot, piezas impresas en 3D y láseres.



Ilustración 7. Ejemplo de carro V-Slot

La calibración del robot se realiza a través de Matlab con la siguiente función en los modos '0' y '1':

```
function calibrarArduino(Arduino,modo,motor,pul);
```

El modo '0' guarda la posición actual de cada uno de los motores como la posición de reposo. El modo '1' sirve para enviar un número de pulsos a un motor concreto, realizando de esta manera, poco a poco, una calibración de cada uno de los motores hasta que el robot se encuentre alineado con los láseres lineares fijos de los perfiles.

Los experimentos realizados se han centrado en la medición de las coordenadas de la posición final del extremo del robot calculada de forma directa o mediante la generación de una trayectoria. Además, se han generado trayectorias con diferente número de puntos intermedios para enriquecer el estudio y la discusión posterior.

Una vez analizados los datos obtenidos, se puede concluir que el error de posicionamiento producido en la generación de trayectorias es menor que en el posicionamiento directo. Sin embargo, no se aprecia una influencia significativa del número de puntos intermedios de las trayectorias.

Como posibles futuras líneas de investigación para este proyecto se han propuesto la mejora de la interfaz, la reconstrucción con materiales más fiables y que generen menos rozamiento, la instalación de una herramienta en el extremo del robot, ya sea una pinza o una cámara para inspección, el diseño de un método de calibración y de medición más fiable y preciso, y la implementación de un control mediante *joystick* o realidad virtual.

La conclusión principal obtenida de la realización de este proyecto es que se observan diferencias entre el comportamiento del robot físico y los obtenidos de manera teórica, lo cual puede deberse a que se ha considerado un comportamiento ideal para el robot (la flexión de la sección se distribuye uniformemente a lo largo de todos los discos que la conforman), a la fricción entre cables y discos, a una mala calibración inicial o a la pérdida de ésta según se avanza con las pruebas.

Sin embargo, hay que destacar que el comportamiento del robot no es del todo erróneo ya que se orienta y aproxima hacia el punto deseado y, pese a que se trata del primer prototipo realizado en el Centro de Automática y Robótica que emplea *twin-pivot compliant joints* como método constructivo, el *Pylori-I* posee todas las características buscadas para tener una gran flexibilidad y maniobrabilidad.

Información accesible:

Repositorio:

<https://github.com/LnaMzSz/Pylori-I>

Lista de reproducción:

https://youtube.com/playlist?list=PL3Q5Xz4yvA3jVhCCdIYlbSSO-qLm97V_n

Palabras clave:

Automática, automatización, continuo, control, híper-redundante, manipulador, robot, robótica, simulación.

Códigos UNESCO:

120326 – Simulación

330491 – Robótica

331101 – Tecnología de la automatización

331102 – Ingeniería de control

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|------|
| AGRADECIMIENTOS | V |
| RESUMEN | VII |
| ABSTRACT | IX |
| RESUMEN EJECUTIVO | XI |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | XVII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XIX |
| ÍNDICE DE TABLAS | XXI |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.1.1. Motivación personal | 1 |
| 1.2. Objetivos | 1 |
| 1.3. Estructura del proyecto | 2 |
| 2. ESTADO DEL ARTE | 5 |
| 2.1. Los robots | 5 |
| 2.2. Clasificación de los robots | 5 |
| 2.3. Robots híper-redundantes actuados mediante cables | 8 |
| 2.3.1. Soluciones previas en el CAR | 9 |
| 2.3.2. <i>Backbone vs. twin-pivot complaint joints</i> | 10 |
| 2.4. El endoscopio | 11 |
| 2.4.1. Endoscopios robotizados | 11 |
| 3. DISEÑO MECÁNICO Y CONSTRUCCIÓN | 15 |
| 3.1. Generalidades | 15 |
| 3.2. Requisitos del brazo robótico | 15 |
| 3.2.1. Sección y longitud | 15 |
| 3.2.2. Utillaje | 15 |
| 3.3. Diseños conceptuales previos | 15 |
| 3.3.1. Prototipo 1 | 16 |
| 3.3.2. Prototipo 2 | 16 |
| 3.3.3. Comparación de prototipos | 17 |
| 3.4. Desarrollo | 17 |
| 3.5. Componentes, rediseño e impresión 3D | 21 |
| 3.6. Materiales | 24 |
| 3.7. Construcción | 26 |
| 4. CONTROL DE MOVIMIENTO DEL PYLORI-I | 29 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.1. | Estudio de las cinemáticas..... | 29 |
| 4.2. | Posicionamiento del extremo..... | 30 |
| 4.3. | Generación de trayectorias | 30 |
| 4.4. | Detección de colisiones..... | 31 |
| 4.5. | Cálculo de longitudes | 32 |
| 4.6. | Transformación de longitud a pulsos..... | 33 |
| 4.7. | Espacio de trabajo..... | 33 |
| 4.8. | Interfaz hombre-máquina..... | 35 |
| 5. | HARDWARE DE CONTROL..... | 37 |
| 5.1. | Armario eléctrico..... | 37 |
| 5.1.1. | Puesta en marcha del armario..... | 39 |
| 5.1.2. | Tabla de equivalencia..... | 39 |
| 5.2. | Arduino..... | 41 |
| 5.2.1. | Ejemplo..... | 42 |
| 5.3. | Relación longitud-pulsos..... | 42 |
| 6. | EXPERIMENTOS Y RESULTADOS | 43 |
| 6.1. | Espacio de trabajo..... | 43 |
| 6.2. | Puesta en marcha..... | 44 |
| 6.3. | Realización de pruebas..... | 45 |
| 6.4. | Discusión de los resultados..... | 46 |
| 7. | LINEAS FUTURAS | 47 |
| 8. | CONCLUSIONES..... | 49 |
| 9. | ENLACES EXTERNOS..... | 51 |
| 10. | BIBLIOGRAFÍA..... | 53 |
| | ANEXO I: GLOSARIO Y ABREVIATURAS..... | 55 |
| | ANEXO II: IMPACTO SOCIAL, AMBIENTAL Y ECONÓMICO..... | 57 |
| | ANEXO III: PLANIFICACIÓN TEMPORAL..... | 59 |
| III.1. | Estructura de Descomposición del Proyecto: EDP..... | 59 |
| III.2. | Diagrama de Gantt..... | 59 |
| | ANEXO IV: ESTUDIO ECONÓMICO..... | 61 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|------|
| <i>Ilustración 1. Prototipo de robot continuo e híper-redundante. Fuente:</i> <i>http://www.ccad.uiowa.edu/sites/www.ccad.uiowa.edu.vsr/files/files/Continuum-Robot-AR.pdf</i> | XI |
| <i>Ilustración 2. Pylori-I conectado al armario eléctrico y colocado horizontalmente sobre el soporte</i> | XII |
| <i>Ilustración 3. Cables usados para la actuación. Fuente: https://www.amazon.es/</i> | XII |
| <i>Ilustración 4. Discos utilizados en la construcción de las secciones</i> | XIII |
| <i>Ilustración 5. Diseño final del Pylori-I realizado con Catia V5</i> | XIII |
| <i>Ilustración 6. Pantalla principal de la interfaz</i> | XIV |
| <i>Ilustración 7. Ejemplo de carro V-Slot</i> | XIV |
| <i>Ilustración 8. Ejemplo de robot continuo construido mediante twin-pivot compliant joints. Fuente: [3]</i> .. | 1 |
| <i>Ilustración 9. Ejemplo de snake-robot. Fuente: https://www.reset.etsii.upm.es/</i> | 5 |
| <i>Ilustración 10. Diagrama de Venn para la clasificación de los robots. Fuente: [6]</i> | 5 |
| <i>Ilustración 11. Representación en función de su número de GdL en un espacio tridimensional ($m=3$). (a) Robot no redundante de tipo $n < m$. (b) Robot no redundante de tipo $n = m$. (c) Robot redundante de tipo $n > m$. (d) Robot híper-redundante de tipo $n = 2m$. Fuente: [6]</i> | 6 |
| <i>Ilustración 12. Ejemplo de robot manipulador móvil. Fuente:</i> <i>https://robotnik.eu/es/productos/manipuladores-moviles/</i> | 7 |
| <i>Ilustración 13. Ejemplo de robot blando. OctArm VI. Fuente: [6]</i> | 7 |
| <i>Ilustración 14. Ejemplo de representación de un robot continuo accionado mediante cables. Fuente:</i> <i>[2]</i> | 8 |
| <i>Ilustración 15. Robot Kyma ('onda' en griego). Fuente: [9]</i> | 9 |
| <i>Ilustración 16. Robot MACH-I. Fuente: [10]</i> | 9 |
| <i>Ilustración 17. Esquema de la construcción de robots continuos. En el caso del uso de TPCJ (a), los segmentos están desfasados alternativamente $\pi/2$. Fuente: [12]</i> | 10 |
| <i>Ilustración 18. Parámetros de la cinemática de robots continuos con backbone y TPCJ. Fuente: [12]</i> .. | 11 |
| <i>Ilustración 19. Esquema de broncoscopia pulmonar. Fuente: [14]</i> | 12 |
| <i>Ilustración 20. Robot concéntrico compuesto de un tubo exterior y un tubo guía que alberga la fibra láser (roja). Fuente: [15]</i> | 12 |
| <i>Ilustración 21. (A) Sistema de robot continuo tubular para cirugía de laringe. (B) Modelo de laringe porcina siendo visualizado mediante endoscopia. Fuente: [16]</i> | 13 |
| <i>Ilustración 22. Diseño CAD prototipo 1. Fuente: elaboración propia</i> | 16 |
| <i>Ilustración 23. Modelo TPCJ y desfase de 90° entre discos</i> | 16 |
| <i>Ilustración 24. Diseño CAD prototipo 2. Fuente: [1]</i> | 16 |
| <i>Ilustración 25. Disco prototipo 2 y eje flexible. Fuentes: [1] y https://amzn.to/2WA6ahA</i> | 17 |
| <i>Ilustración 26. Bacteria Helicobacter Pylori y robot Pylori-I. Fuente:</i> <i>https://cinfasalud.cinfa.com/p/helicobacter-pylori/</i> | 17 |
| <i>Ilustración 27. Diagrama de fuerzas en el brazo completo</i> | 19 |
| <i>Ilustración 28. Reducción de fuerzas</i> | 19 |
| <i>Ilustración 29. Distribución de cuatro cables y ejes de giro</i> | 20 |
| <i>Ilustración 30. Vista superior de un disco (válida para ambos tipos)</i> | 21 |
| <i>Ilustración 31. Vista lateral de un disco estándar</i> | 21 |
| <i>Ilustración 32. Parte superior del distribuidor de cables</i> | 22 |
| <i>Ilustración 33. Montaje de un motor y su polea en una de las bases</i> | 22 |
| <i>Ilustración 34. Diferentes vistas de las poleas empleadas</i> | 23 |
| <i>Ilustración 35. Robot colocado sobre el soporte</i> | 23 |
| <i>Ilustración 36. Bobina de Nylon PA12 Blanco. Fuente: https://www.3djake.es/fiberlogy/nylon-pa12-white</i> | 24 |
| <i>Ilustración 37. Bobina de PLA Negro. Fuente: https://www.impresoras3d.com/filamento/pla/</i> | 24 |
| <i>Ilustración 38. Tipos de hilo empleados para la construcción. Fuente: https://www.amazon.es/</i> | 24 |
| <i>Ilustración 39. Muestra del nudo empleado con los cables</i> | 25 |
| <i>Ilustración 40. Malla cubre cables. Fuente: https://computacion.mercadolibre.com.ar/cables-hubs-usb/cables/mallas-cubre-cables/</i> | 25 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Ilustración 41. Modelo de motor PaP utilizado en el proyecto.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Ilustración 42. Brazo robótico antes y después de ser recubierto por la malla</i> | <i>26</i> |
| <i>Ilustración 43. Resultado final del montaje.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Ilustración 44. Cable y conectores para la conexión al armario.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Ilustración 45. A la izquierda, Método de la Jacobiana utilizando como variables los ángulos de los discos. A la derecha, Método de la Jacobiana utilizando como variables los ángulos de las secciones</i> | <i>29</i> |
| <i>Ilustración 46. Posición real del extremo y error generado con el Método del Descenso del Gradiente.</i> | <i>29</i> |
| <i>Ilustración 47. Posicionamiento del extremo mediante el Método del Descenso del Gradiente.</i> | <i>30</i> |
| <i>Ilustración 48. Ejemplo de generación de trayectoria rectilínea.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Ilustración 49. Representación de los ángulos θ, ϕ y α de la sección. Fuente: Modificado de [17]</i> | <i>32</i> |
| <i>Ilustración 50. Proyección de los vectores rotación de las articulaciones. Fuente: [17].....</i> | <i>33</i> |
| <i>Ilustración 51. Espacio de trabajo evaluado para 1331 puntos y 250 iteraciones</i> | <i>34</i> |
| <i>Ilustración 52. Espacio de trabajo evaluado para 2520 puntos y 250 iteraciones</i> | <i>34</i> |
| <i>Ilustración 53. Densidad en porcentaje de cada tipo de punto respecto al total</i> | <i>34</i> |
| <i>Ilustración 54. Pantalla principal de control de la IHM.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Ilustración 55. Pantalla de conexión Matlab-Arduino de la IHM.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Ilustración 56. Pantalla de calibración de la IHM.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Ilustración 57. Pantalla de colisiones y ejemplo</i> | <i>36</i> |
| <i>Ilustración 58. Armario eléctrico para 18 motores PaP</i> | <i>37</i> |
| <i>Ilustración 59. Interior del armario eléctrico y distribución de drivers.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Ilustración 60. Conexión de los motores PaP al armario</i> | <i>38</i> |
| <i>Ilustración 61. Distribución de los conectores.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Ilustración 62. Visión general del espacio de trabajo y posicionamiento del Pylori-I en el mismo</i> | <i>43</i> |
| <i>Ilustración 63. Láseres lineales.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Ilustración 64. Láseres de punto y carros V-Slot.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Ilustración 65. Pylori-I completamente alineado tras la calibración.....</i> | <i>44</i> |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabla 1. Características del Pylori-I.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Tabla 2. Configuración de los micropasos para un motor de 200 pasos.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Tabla 3. Configuración de los de la corriente para un motor de 200 pasos.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Tabla 4. Correspondencia entre pines de Arduino y señales de los drivers.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Tabla 5. Descripción de los comandos disponibles.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Tabla 6. Pruebas de posicionamiento del extremo.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Tabla 7. Pruebas de posicionamiento mediante trayectoria rectilínea (N = 6).....</i> | <i>45</i> |
| <i>Tabla 8. Pruebas de posicionamiento mediante trayectoria rectilínea (N = 12).....</i> | <i>45</i> |
| <i>Tabla 9. Duración y distribución a lo largo del tiempo de las diferentes tareas.....</i> | <i>59</i> |

1. INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La principal motivación para la realización de este proyecto es que se trata de un gran reto tanto mecánico como automático, dada la innovación y la dedicación necesaria.

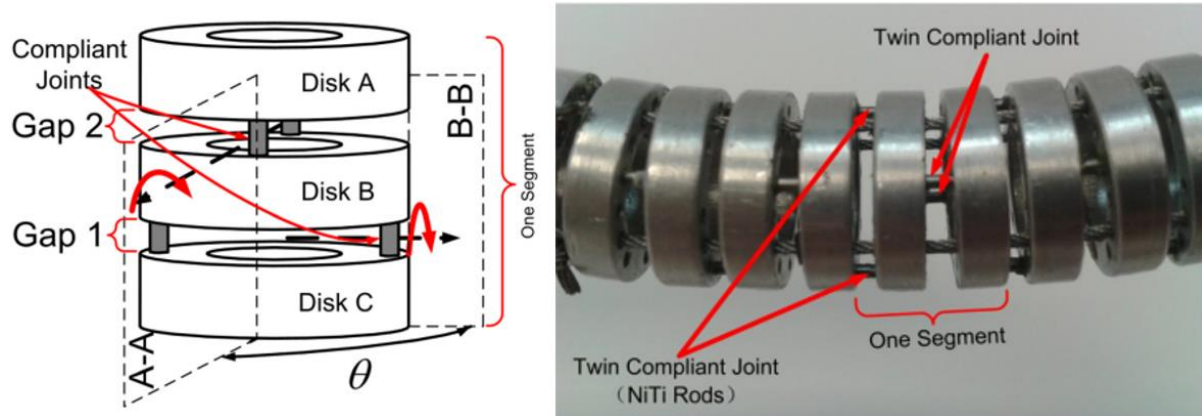


Ilustración 8. Ejemplo de robot continuo construido mediante twin-pivot compliant joints. Fuente: [3]

Pese a la idea previa de que, quizás, tras su realización, acabara siendo un proyecto poco viable o no funcionara de manera correcta fuera de la simulación por tratarse de un primer prototipo, la posibilidad de adentrarse de esta manera en el campo de la robótica y poner en práctica todos los conocimientos adquiridos durante estos últimos años fue suficiente para seguir adelante.

Por último, ser partícipe de un proyecto tan amplio que involucra tantos campos de la ingeniería y tantas líneas futuras diferentes de investigación y de mejora, ha supuesto adquirir unos conocimientos que, realizando un proyecto más común y conocido, no habría sido posible obtener.

1.1.1. Motivación personal

Por otro lado, la motivación personal que me ha llevado hasta aquí ha sido lo atractiva que era la idea de construir y controlar un tipo de robot diferente de los que ya se han estudiado en otros trabajos de fin de carrera o máster en el Centro de Automática y Robótica (CAR).

También es un orgullo poder retomar un proyecto ideado por un amigo y antiguo alumno y hacerlo real, además de su desarrollo en simulación.

1.2. Objetivos

Los objetivos del proyecto se pueden dividir en tres partes:

En primer lugar, realizar un estudio del estado del arte de robots híper-redundantes, e investigar y adquirir los conocimientos necesarios para la adaptación del diseño original y su posterior construcción y control. En concreto, se ha decidido abarcar la posible mejora que puede suponer un robot híper-redundante que no posea un eje flexible central y que sea de tamaño muy reducido.

Para rediseñar los componentes existentes y crear nuevos, será necesario familiarizarse con el uso de programas tanto de diseño 3D, concretamente Catia V5 y Autodesk Fusion 360; como de impresión 3D, Simplify 3D y Prusa Slicer.

En segundo lugar, se encuentra el estudio de las cinemáticas existentes del robot mediante Matlab. Para ello, se emplea una simulación que permite contemplar el comportamiento del robot en tres dimensiones dentro de su espacio de trabajo. Además, se añaden nuevas restricciones, así como la detección de colisiones, el cálculo de trayectorias y del espacio de trabajo, la estimación de las elongaciones de los cables y la comunicación Matlab-Arduino.

En tercer y último lugar, se procede con la construcción del robot, el estudio del armario eléctrico proporcionado por el CAR, la realización del control mediante Arduino, y la realización de los experimentos de comprobación del funcionamiento.

Además de todo lo mencionado, se pretende aprender a realizar un Trabajo de Fin de Grado, con la correspondiente adquisición de nuevos conocimientos y capacidades como la planificación temporal o el estudio económico de un proyecto.

1.3. Estructura del proyecto

A continuación, se realiza un breve resumen por capítulos de todo el trabajo, excluyendo el capítulo actual, Cap. 1: INTRODUCCIÓN, en el que se han explicado la motivación, los diferentes objetivos buscados, y la siguiente estructura:

- **Cap. 2: ESTADO DEL ARTE**

Se explicará qué son los robots híper-redundantes, sus principales características, sus clasificaciones, los diferentes tipos de construcción y su similitud con los endoscopios utilizados en medicina.

- **Cap. 3: DISEÑO MECÁNICO Y CONSTRUCCIÓN**

En este capítulo se realizará una comparación de prototipos y se mostrará el diseño final elegido. Se explicarán las diferentes partes que componen al robot, los rediseños de componentes necesarios y la posterior construcción.

- **Cap. 4: CONTROL DE MOVIMIENTO DEL PYLORI-I**

En este capítulo se estudiarán las diferentes cinemáticas existentes y se explicarán las funcionalidades programadas para el robot.

- **Cap. 5: HARDWARE DE CONTROL**

Se hará una descripción de los componentes del armario eléctrico, así como del control realizado con Arduino.

- **Cap. 6: EXPERIMENTOS Y RESULTADOS**

Se explicará la puesta en marcha del robot, se expondrán los resultados de los experimentos realizados, y se discutirán los posibles fallos y mejoras.

- **Cap. 7: LÍNEAS FUTURAS**

Tras la discusión de los resultados obtenidos, se estudiarán las posibles mejoras futuras y las nuevas líneas de investigación que se podrían seguir de aquí en adelante.

- **Cap. 8: CONCLUSIONES**

Una vez realizados los capítulos anteriores, se resumirán en este último todas las conclusiones, tanto positivas como negativas, a las que se haya llegado a lo largo del proyecto.

- **ANEXO I: GLOSARIO Y ABREVIATURAS**

Se incluirán las definiciones y abreviaturas de las palabras clave del proyecto.

- **ANEXO II: IMPACTO SOCIAL, AMBIENTAL Y ECONÓMICO**

En este anexo, se expondrá un breve estudio del impacto que este proyecto puede llegar a producir en el mundo, tanto medioambientalmente como de manera social y económica.

- **ANEXO III: PLANIFICACIÓN TEMPORAL**

Se mostrará la planificación temporal a través de un diagrama de Gantt y una Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP).

- **ANEXO IV: ESTUDIO ECONÓMICO**

Por último, se realizará un estudio de los costes totales que ha supuesto la realización de este proyecto.

2. ESTADO DEL ARTE



2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Los robots

Existen diferentes definiciones para lo que se conoce como “robot”. Por ejemplo, puede referirse a un objeto que imita comportamientos de un ser animado, una persona que actúa de manera mecánica, o una máquina programable que es capaz de manipular objetos y realizar diferentes tareas.[4] Para este proyecto, la definición más adecuada es la última mencionada.



Ilustración 9. Ejemplo de snake-robot. Fuente: <https://www.reset.etsii.upm.es/>

Por otro lado, el término "híper-redundante", al cual se hará mención muy frecuentemente a lo largo del documento, se refiere a manipuladores con un número muy grande de grados de libertad en comparación con los robots más comunes. Además, se trata de robots que se asemejan bastante a serpientes, gusanos, trompas de elefante o tentáculos. [5]

Aunque el proyecto trata de un robot híper-redundante, se va a hacer un estudio de la clasificación general de los robots para más adelante profundizar en el sector que concierne a este trabajo.

2.2. Clasificación de los robots

Los robots pueden clasificarse siguiendo cinco características diferentes: según su número de grados de libertad (GdL), según su número de articulaciones, según su funcionalidad, según los materiales con los que se ha construido, y según el tipo de actuación empleada.

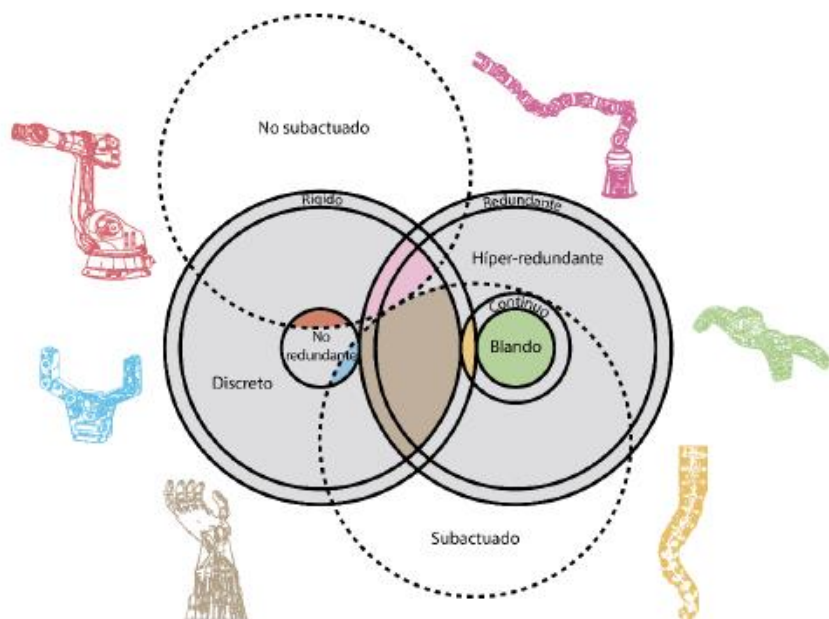


Ilustración 10. Diagrama de Venn para la clasificación de los robots. Fuente: [6]

- **Según el número de GdL**

El número de GdL de un robot es el número de coordenadas independientes que son necesarias para posicionar su extremo respecto a un sistema de referencia dado. [7]

Dentro de esta clasificación se pueden distinguir tres tipos diferentes de robots: **no redundantes, redundantes e híper-redundantes**.

Siendo m las dimensiones del espacio de trabajo del robot, el número de GdL mínimos necesarios para posicionar su extremo viene dado por la siguiente expresión:

$$n = \frac{m \cdot (m + 1)}{2}$$

De esta manera, se clasificarán como no redundantes aquellos que tengan un número de GdL menor o igual al mínimo necesario; como redundantes aquellos con un número de GdL mayor que el necesario; y como híper-redundantes aquellos que tengan al menos el doble de GdL necesarios.

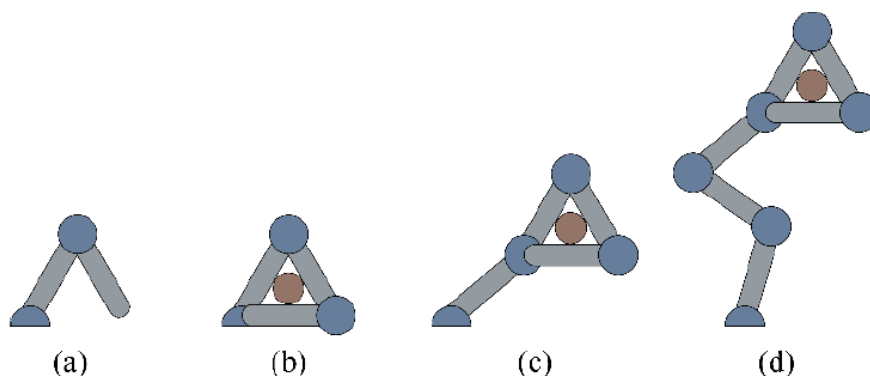


Ilustración 11. Representación en función de su número de GdL en un espacio tridimensional ($m=3$). (a) Robot no redundante de tipo $n < m$. (b) Robot no redundante de tipo $n = m$. (c) Robot redundante de tipo $n > m$. (d) Robot híper-redundante de tipo $n = 2m$. Fuente: [6]

- **Según el número de articulaciones**

Hay que destacar que el término “articulación” no es el mismo que el término “GdL”. Una articulación consiste en una unión entre dos piezas rígidas que permite el movimiento relativo entre ellas. [4]

A su vez, en esta otra clasificación, se diferenciará entre **robots continuos** y **robots discretos**.

Los primeros son aquellos que no están formados por uniones rígidas sino por una estructura en la que un único actuador puede transmitir movimiento a más de un eje. Esto provoca que el robot se deforme de manera continuada y natural, de ahí su nombre.

Por otro lado, se denominan robots discretos a aquellos contruidos mediante uniones rígidas y perfectamente distinguibles.

- **Según su funcionalidad**

Atendiendo a la funcionalidad que se tiene como objetivo para el robot, se encuentran dos posibles tipos de robot: **manipuladores** y **móviles**.

Los robots manipuladores buscan precisión en el posicionamiento del extremo para poder emplear una herramienta que manipule objetos. Además, suelen encontrarse en un espacio de trabajo fijo dentro del cual no se desplazan.

Sin embargo, los robots móviles tienen la capacidad de moverse de un lugar a otro, no teniendo un espacio de trabajo definido.

Cabe la posibilidad de encontrar una mezcla de ambos tipos, los llamados robots híbridos. Estos robots son manipuladores situados en bases móviles, dotando así de locomoción a los primeros. [6]



Ilustración 12. Ejemplo de robot manipulador móvil. Fuente: <https://robotnik.eu/es/productos/manipuladores-moviles/>

- **Según los materiales de construcción**

Teniendo en cuenta los materiales utilizados en la construcción del robot, se diferenciará entre **robots duros** y **robots blandos**.

Los robots duros (*hard robots*) están constituidos por articulaciones rígidas, tratándose así de robots no redundantes generalmente. Por otro lado, los robots blandos (*soft robots*) tienen una gran adaptación al entorno que les permite sortear objetos con facilidad y pueden ser usados como robots colaborativos dado que están compuestos por materiales blandos que no causarían grandes daños en caso de colisión con una persona. [8]

Como se puede apreciar en la Ilustración 10, los robots de tipo blando están englobados dentro de los robots híper-redundantes y continuos.

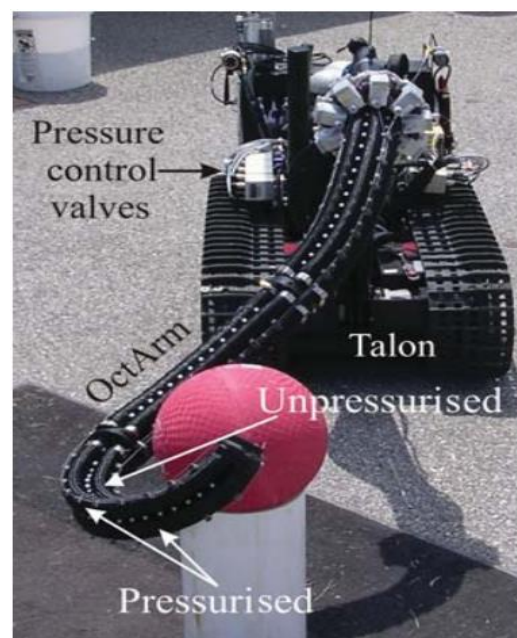


Ilustración 13. Ejemplo de robot blando. OctArm VI. Fuente: [6]

- **Según el tipo de actuación**

Para conseguir un movimiento a lo largo de la estructura del robot, es necesario tener un método de actuación para las articulaciones. Los más utilizados en el caso de robots híper-

redundantes son el accionamiento mediante **cables**, las **articulaciones motorizadas** y la **actuación neumática**. [1]

El accionamiento por cables permite transferir movimiento a zonas concretas del robot mediante la aplicación de tensión, dotando a la estructura de un movimiento continuo y natural.

Para generar dicha tensión, se emplean motores eléctricos situados en una base extrínseca al brazo robótico, lo cual permite reducir en gran cantidad el peso de éste.

Por otro lado, las articulaciones motorizadas sí forman parte del cuerpo del robot ya que, por lo general, los motores se colocan en las propias articulaciones. Se evita la utilización de elementos de actuación, pero se incrementa en gran medida el peso del robot, lo cual no resulta viable para la construcción.

Por último, hay que destacar que la actuación neumática tiene muchas aplicaciones y es comúnmente utilizada en robots blandos debido a que el aire comprimido no proporciona una estructura rígida por completo. Al igual que en la actuación por cables, se trabaja de forma extrínseca al brazo robótico, pero la dificultad de control es mayor a causa de la regulación de las presiones.

La actuación por cables y por aire comprimido son las más empleadas en robots hiper-redundantes, como ya se ha mencionado, debido a sus numerosas ventajas: reducción del peso del robot, trabajo de manera extrínseca, dotación de un movimiento continuo y natural, semejanza con elementos biológicos que evita impactos ambientales, y posibilidad de funcionar como robots colaborativos.

2.3. Robots hiper-redundantes actuados mediante cables

Como ya se ha mencionado anteriormente, el *Pylori-I* es un robot hiper-redundante continuo actuado mediante cables y motores paso a paso (PaP). Como referencia de estudio, se han tenido soluciones anteriores realizadas en el CAR y que han servido para fijar los objetivos de este trabajo.



Ilustración 14. Ejemplo de representación de un robot continuo accionado mediante cables. Fuente: [2]

La actuación mediante cables es uno de los principios de actuación más destacados para los robots continuos como ya se ha comentado anteriormente. Hasta la fecha, se ha derivado una amplia variedad de enfoques de modelado para describir las deformaciones de los robots continuos accionados por cables.

2.3.1. Soluciones previas en el CAR

- **Kyma**

Consiste en un robot de tipo blando y continuo desarrollado por Cecilia Martínez en 2017 [9]. Está construido con fuelles que proporcionan tres GdL por sección, con un total de cuatro secciones.



Ilustración 15. Robot Kyma ('onda' en griego). Fuente: [9]

El accionamiento de este robot se realiza mediante cables y motores PaP conectados entre sí mediante poleas.

- **MACH-I**

Se trata de un robot inspirado en la trompa de un elefante. Fue diseñado y desarrollado inicialmente por Iván Rodríguez en 2019 [1] y continuado más adelante por David Márquez en 2021 [10].

Es un robot híper-redundante actuado por cables, pero al contrario que ocurría con el robot *Kyma*, el *MACH-I* se clasifica como robot duro y discreto.

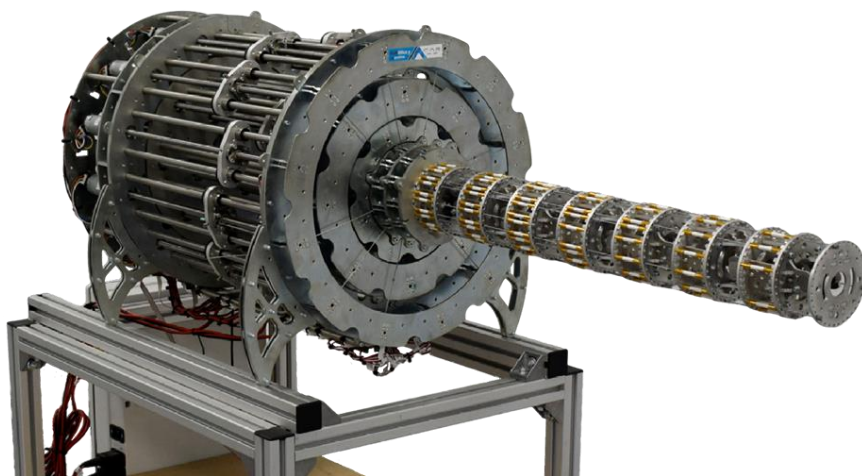


Ilustración 16. Robot MACH-I. Fuente: [10]

Consta de siete articulaciones con dos GdL por cada una, lo que le confiere su cualidad de robot híper-redundante. Además, cuenta con tres GdL adicionales para actuar sobre una herramienta situada en su extremo.

2.3.2. *Backbone vs. twin-pivot complaint joints*

En este proyecto, se va a profundizar en la utilización de pivotes en las uniones en lugar de la unión mediante eje flexible o rótulas, lo cual se considera una innovación debido a que no se ha desarrollado ningún robot de este tipo previamente en el CAR. A continuación, se hace un breve estudio y comparación de la información que se tiene respecto a ambas soluciones.

La unidad básica de un robot continuo accionado por cables es el denominado “segmento”. Un segmento es en un componente rígido, llamado disco, junto con un cuerpo elástico, conocido como *backbone*. [11]

El objetivo de cada uno de los discos que componen la estructura es guiar los cables a través de ésta hasta el extremo de la sección correspondiente, y actuar como limitación de movimiento de la *backbone*.

Por otro lado, la función del eje flexible (*backbone*) es dotar al robot de la capacidad de adaptación a diferentes posiciones.

El método utilizado más comúnmente es aquel que utiliza un eje flexible colocado en el eje neutral de los discos del brazo robótico, pero conlleva un gran inconveniente a largo plazo. Este eje flexible tiende a sufrir deformaciones, lo cual provoca la pérdida de control de movimientos de los sectores finales.

Para resolver dicha desventaja, los robots que emplean *twin-pivot complaint joints* (TPCJ) cambian el diseño de una *backbone* por dos elementos elásticos diametralmente opuestos. Esta modificación aporta mayor rigidez torsional y libera el eje central para un posible paso de cables para la conexión de una herramienta en el Tool Center Point (TCP). [12]

El montaje que emplea TPCJ, a diferencia de lo que ocurre con un eje flexible, limita los GdL del segmento a uno solo, siendo el eje de flexión del disco el perpendicular al generado por los dos pivotes.

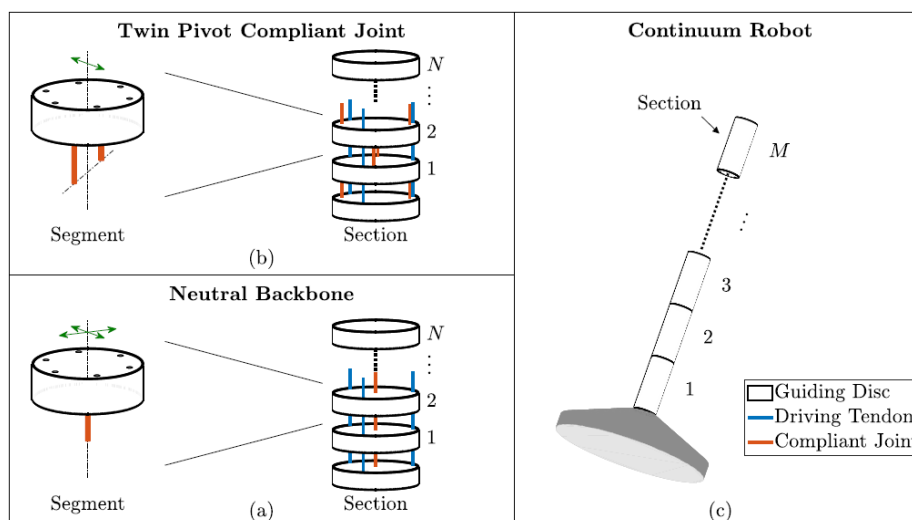


Ilustración 17. Esquema de la construcción de robots continuos. En el caso del uso de TPCJ (a), los segmentos están desfasados alternativamente $\pi/2$. Fuente: [12]

Una vez apilados N discos, se obtiene la denominada “sección” de un robot. Cada sección está actuada por tres o cuatro cables generalmente, en el caso del *Pylori-I*, se utilizarán cuatro cables actuadores.

Cada uno de los discos pertenecientes a una sección están vinculados cinéticamente entre sí y actuados por los mismos cables. De manera ideal, que es la que se ha considerado en el desarrollo de este proyecto, la flexión de la sección se distribuirá uniformemente a lo largo de todos los discos que la conforman.

Cabe destacar que el número total de GdL del robot en el caso de utilización de TPCJ, viene dado por el apilamiento de discos con un solo GdL desfasados $\pi/2$ entre sí, de tal forma que se obtengan dos GdL por sección, asemejándose así al uso de *backbone*.

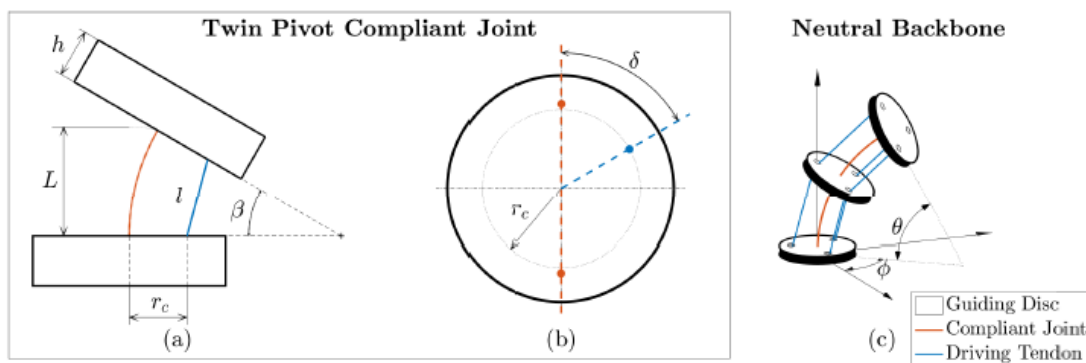


Ilustración 18. Parámetros de la cinemática de robots continuos con backbone y TPCJ. Fuente: [12]

Por último, llegada la hora de la construcción del prototipo, se ha de tener en cuenta que los actuadores de las últimas secciones tienen que pasar a través de las anteriores. Como los cables de las últimas secciones no pueden pasar por las mismas guías que los anteriores, la solución es un desplazamiento angular δ en torno al eje central de los discos para cada sección.

2.4. El endoscopio

Los robots continuos son delgados y blandos, y se caracterizan por su alta flexibilidad y su fácil miniaturización. Estas ventajas de las que disponen permiten su aplicación en áreas como la inspección o la cirugía poco invasiva en distintas especialidades médicas y quirúrgicas (neumología, otorrinolaringología, cardiología, aparato digestivo, cirugía general y neurocirugía entre otras). [2]

El endoscopio es un dispositivo médico con una luz incluida creado para poder adentrarse dentro de una cavidad u órgano corporal y observarla. Los procedimientos médicos que utilizan estos instrumentos se denominan “endoscopias”. [13]

2.4.1. Endoscopios robotizados

A continuación, se van a exponer diferentes escenarios en los que se han empleado robots similares al *Pylori-I* que han sido desarrollados hasta el punto de aplicación en áreas médicas del día a día.

En el área de la neumología, este tipo de robots se han empleado en la toma de muestras de tejido pulmonar a través de bronquios distales de pequeño calibre. [14] Cuanto mayor es la miniaturización de estos endoscopios robotizados, menor será el calibre de los bronquios a los que se puede llegar a acceder con ellos.

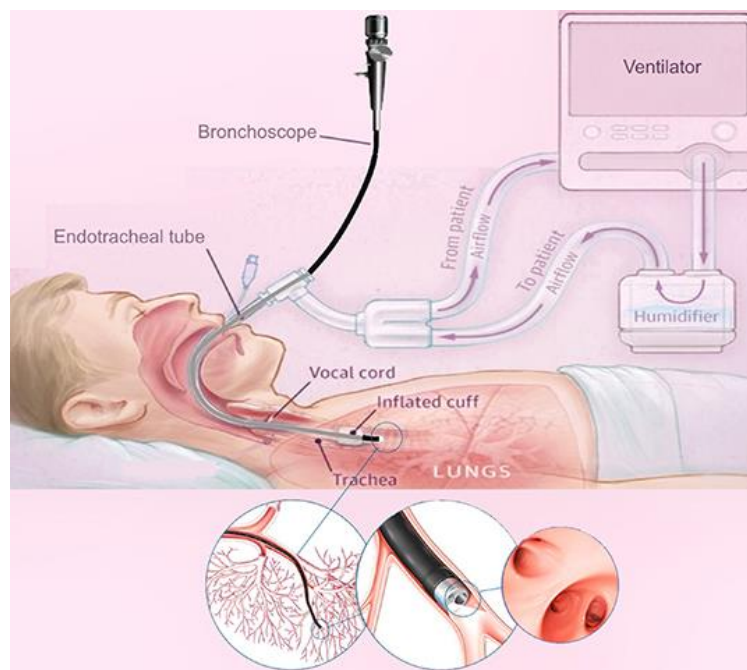


Ilustración 19. Esquema de broncoscopia pulmonar. Fuente: [14]

Este tipo de muestreo pulmonar en pacientes con enfermedades pulmonares como la COVID-19 no está estandarizado, carece de reproducibilidad y requiere operadores expertos. Para ello se propone este tipo de endoscopio (broncoscopio) robotizado que supera los desafíos más importantes a la hora de realizar una broncoscopia, como pueden ser la destreza limitada o el gran tamaño de un broncoscopio convencional. [14]

Dentro del área de la neurocirugía, se puede destacar la termoterapia inducida por láser en el cerebro. Se trata de un procedimiento mínimamente invasivo para acabar con el tejido tumoral.

Dado que los tumores cerebrales de forma irregular no pueden tratarse utilizando los sistemas existentes, se ha presentado un sistema robótico de tubos concéntricos para el tratamiento de éstos. [15]

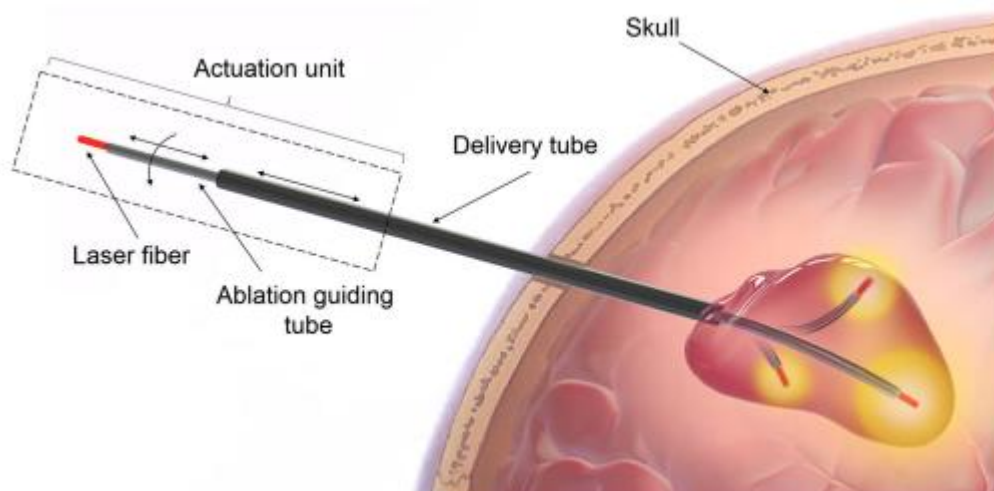


Ilustración 20. Robot concéntrico compuesto de un tubo exterior y un tubo guía que alberga la fibra láser (roja). Fuente: [15]

Por último, en el caso de la otorrinolaringología, se han realizado estudios en modelos de laringes porcinas para evaluar la factibilidad de cirugías transorales con este tipo de robot teleoperado. [16]

La cirugía transoral asistida por robot es cada vez más común lo que conlleva grandes avances en esta área. Sin embargo, los sistemas actuales son incapaces de profundizar lo suficiente como para alcanzar áreas subglóticas.

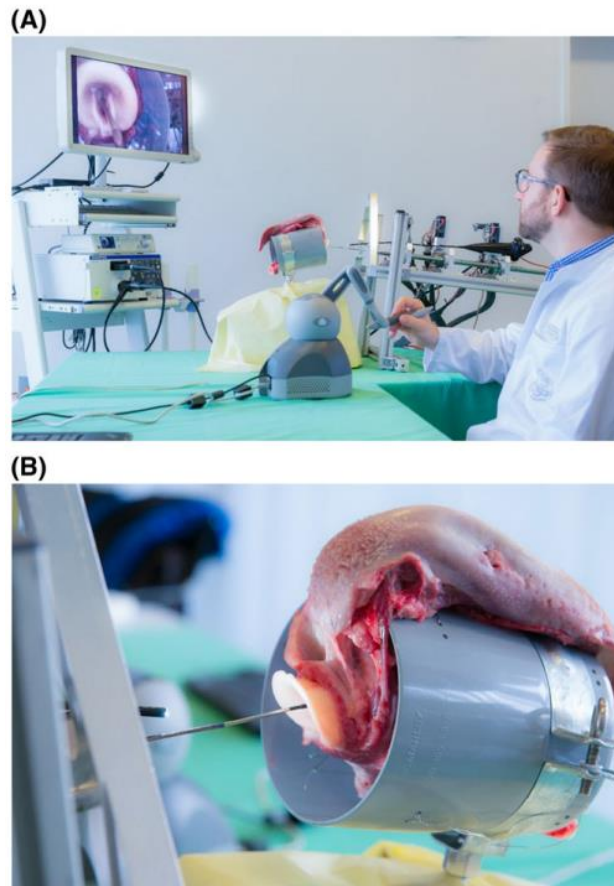


Ilustración 21. (A) Sistema de robot continuo tubular para cirugía de laringe. (B) Modelo de laringe porcina siendo visualizado mediante endoscopia. Fuente: [16]

3. DISEÑO MECÁNICO Y CONSTRUCCIÓN



3. DISEÑO MECÁNICO Y CONSTRUCCIÓN

3.1. Generalidades

Como objetivo principal, se quiere diseñar un robot híper-redundante accionado mediante cables partiendo de las experiencias anteriores en el CAR con robots como *Kyma* y *MACH-I*, pero buscando un tipo diferente de robot. De manera más concreta, el objetivo es diseñar y construir un robot de menor escala que los mencionados y que, además, no utilice juntas rígidas ni un eje flexible central. De esta manera, se ganará accesibilidad a espacios más estrechos o de difícil inspección.

Además, se desea que la base del robot pueda usarse con diferentes prototipos, por lo que ha de ser un diseño estándar, generalizado y fácilmente desmontable.

Por último, dado que se trata de un primer montaje de un prototipo para su estudio, no es necesario que el robot sea duradero en el tiempo. Por lo que los componentes del robot, tanto del brazo robótico como de la base de motores, se van a fabricar por impresión 3D. De esta manera, se espera que se minimicen los costes dentro de lo posible.

3.2. Requisitos del brazo robótico

3.2.1. Sección y longitud

Ambas dimensiones son críticas para el diseño, pues de ellas dependerá el espacio de trabajo del robot. Dado que se parte del diseño del *MACH-I*, la intención es lograr una longitud y sección más reducidas sin grandes pérdidas en maniobrabilidad.

La longitud está directamente relacionada con la sección y la carga soportada. Si consideramos un brazo robótico de sección reducida y longitud elevada, los esfuerzos que deberán soportar cada una de las articulaciones aumentarán considerablemente debido al propio peso del robot y la carga. De igual manera, si la sección se reduce en exceso, la tensión en los cables aumentará para poder compensar los esfuerzos provocados por la carga.

Como primera aproximación, se considera un diámetro máximo de 30 mm y una longitud de entre 25 y 35 cm.

3.2.2. Utillaje

Se espera que el brazo robótico sea capaz de realizar pequeñas inspecciones y/o manipulaciones. Para ello, se ha tenido en cuenta en los cálculos una capacidad de carga de 100 g equivalente a la sujeción de una cámara espía, unas pinzas, un imán, o cualquier otro posible acople en el extremo del robot.

3.3. Diseños conceptuales previos

Estudios previos realizados en el CAR sobre el desarrollo de manipuladores híper-redundantes [1], han identificado dos posibles opciones constructivas para el robot. A continuación, se van a presentar ambas, para después evaluar sus ventajas e inconvenientes y seleccionar así la más adecuada.

El primer diseño es un robot continuo basado en un endoscopio que utiliza articulaciones basadas en el modelo TPCJ. Por otro lado, el segundo prototipo se basa en un núcleo flexible o *backbone* donde no existen articulaciones localizadas.

3.3.1. Prototipo 1

El prototipo 1 es un brazo robótico de 17 mm de diámetro y 260 mm de longitud, y es el de construcción más compleja dado el diseño de direccionamiento de los cables.

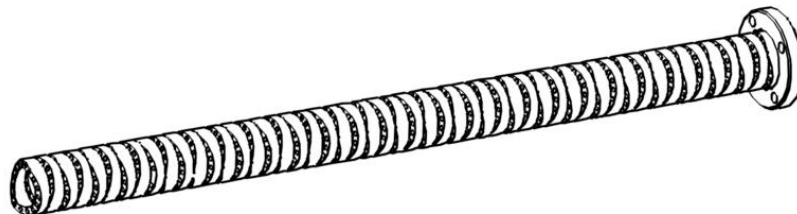


Ilustración 22. Diseño CAD prototipo 1. Fuente: elaboración propia

Consta de cuatro secciones con una distribución de 20-12-12-8 discos desde la base hacia el extremo. Los discos siguen el modelo *TPCJ* y están desfasados 90° entre ellos de manera que los ejes de giro de cada sección quedan sin definir.

El accionamiento se realiza mediante cables que quedan ocultos en el interior del propio robot. En este diseño son necesarios cuatro cables por sección debido al desfase mencionado en el párrafo anterior.

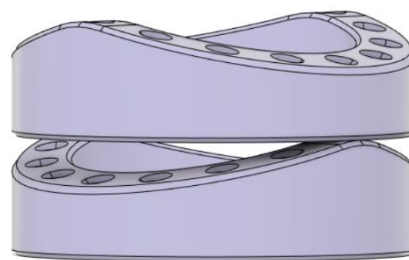


Ilustración 23. Modelo *TPCJ* y desfase de 90° entre discos

El número de secciones viene definido por el número de agujeros para cables que tiene cada disco, en este caso son 16. Si se desea que cada sección únicamente pueda girar sobre un eje, es decir, que no exista desfase entre discos, se emplearían dos cables por sección únicamente y el número de secciones podría duplicarse, llegando a un máximo de ocho.

3.3.2. Prototipo 2

Este modelo tiene una sección de 30 mm y un núcleo flexible de sólo tres milímetros. Está compuesto por siete secciones con tres discos cada una de ellas para proporcionarle una mayor continuidad y, al igual que el prototipo anterior, es accionado mediante cables [1].

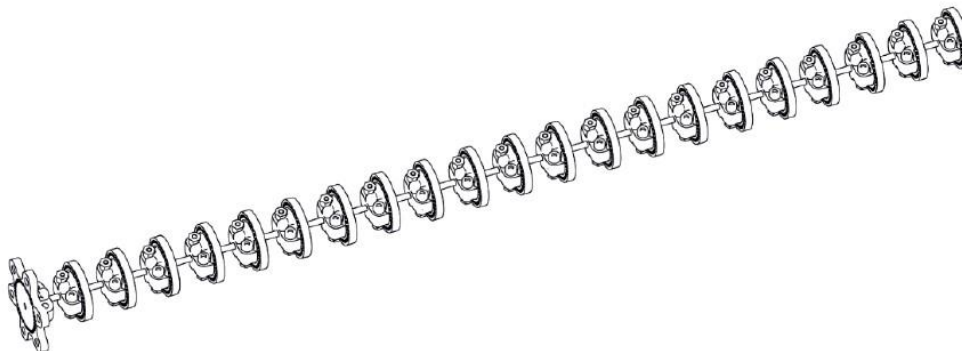


Ilustración 24. Diseño CAD prototipo 2. Fuente: [1]

Cada disco está formado por dos piezas idénticas atornilladas abrazando el núcleo flexible. En conjunto pueden albergar hasta 36 cables, por lo que, utilizando tres cables por sección, el brazo robótico podría ampliarse hasta un máximo de 12 secciones [1].

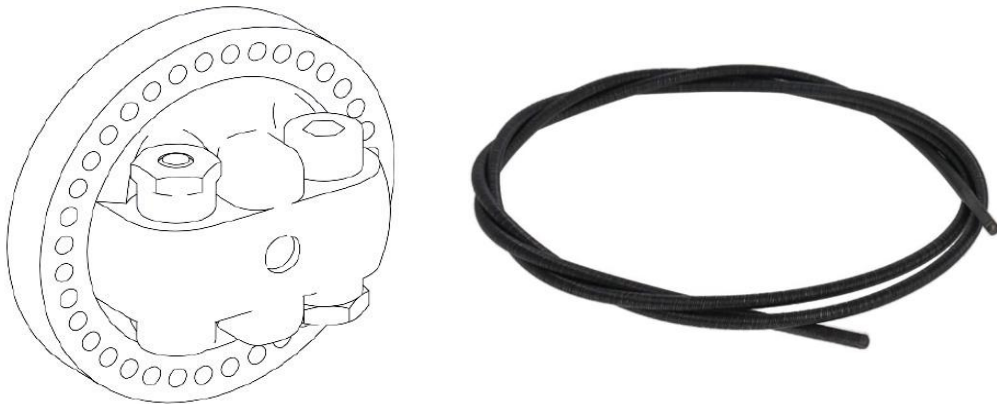


Ilustración 25. Disco prototipo 2 y eje flexible. Fuentes: [1] y <https://amzn.to/2WA6ahA>

El eje flexible posee una gran resistencia a torsión y compresión, pero no hay que olvidar la gran dependencia que supone para el modelo la elasticidad de la que esté dotado el eje.

3.3.3. Comparación de prototipos

A continuación, se exponen brevemente las principales características de ambos prototipos para así, justificar la decisión tomada.

Se trata de dos modelos de robot blando y continuo con un coste de fabricación realmente bajo. A su vez, ambos poseen una baja capacidad de carga, pero como su finalidad son pequeñas inspecciones, para la consideración de una carga máxima de 100 g es suficiente.

Sus diferencias se encuentran en las dimensiones, la facilidad de montaje y el tipo de eje. Pese a la facilidad de montaje del prototipo 2, la disposición de los discos del prototipo 1, su tamaño más reducido y su eje hueco proporcionan mayor libertad de movimiento y precisión. Además, la posibilidad de introducir por el interior el cableado del utillaje, supone una idea innovadora frente al resto de robots construidos con *backbone*.

3.4. Desarrollo

De aquí en adelante, se hará referencia al prototipo 1 como *Pylori-I* dado su diseño basado en un endoscopio y su gran parecido a la bacteria *Helicobacter Pylori*.



Ilustración 26. Bacteria *Helicobacter Pylori* y robot *Pylori-I*. Fuente: <https://cinfasalud.cinfa.com/p/helicobacter-pylori/>

Como se ha comentado anteriormente en la comparación de los dos prototipos, este diseño consta de cuatro secciones actuadas por cuatro motores cada una de ellas, es decir, 16 motores en total.

Es posible añadir más secciones si los discos de cada sección se colocan sin desfase entre ellos, de manera que las secciones tengan un único eje de giro máximo.

Para este trabajo, se ha decidido continuar con la distribución planteada inicialmente: cuatro secciones con una distribución de discos de 20-12-12-8 partiendo desde la base. No se ha profundizado en el estudio de una distribución óptima de discos y secciones ya que esto era motivo de estudio de otro trabajo simultáneo [17].

A continuación, se reflejan las principales características del *Pylori-I*.

Tabla 1. Características del *Pylori-I*

| | | |
|--|----------------------|------------|
| <i>Diámetro exterior del disco (mm)</i> | \varnothing_e | 17 |
| <i>Diámetro interior del disco (mm)</i> | \varnothing_i | 12 |
| <i>Diámetro de disposición de cables (mm)</i> | \varnothing_c | 14.5 |
| <i>Diámetro agujero de cable (mm)</i> | \varnothing_a | 0.9 |
| <i>Altura del disco (mm)</i> | H | 4.8 ~ 5 |
| <i>Altura del pivote (mm)</i> | h | 1.7 |
| <i>Desfase entre cables (°)</i> | α | 22.5 |
| <i>Masa del disco (g)</i> | m_{disco} | 0.49 ~ 0.5 |
| <i>Longitud total (mm)</i> | L | 260 |
| <i>Longitud sección 1 (mm)</i> | L_1 | 100 |
| <i>Longitud sección 2 (mm)</i> | L_2 | 60 |
| <i>Longitud sección 3 (mm)</i> | L_3 | 60 |
| <i>Longitud sección 4 (mm)</i> | L_4 | 40 |
| <i>Número de secciones</i> | M | 4 |
| <i>Número total de discos</i> | N | 52 |
| <i>Discos en la sección 1</i> | N_1 | 20 |
| <i>Discos en la sección 2</i> | N_2 | 12 |
| <i>Discos en la sección 3</i> | N_3 | 12 |
| <i>Discos en la sección 4</i> | N_4 | 8 |
| <i>Cables por sección</i> | n | 4 |
| <i>Ángulo máximo de giro del disco (rad)</i> | β_{max} | 0.23 |
| <i>Ángulo máximo de giro de la sección 1 (rad)</i> | Θ_1 | 2.07 |
| <i>Ángulo máximo de giro de la sección 2 (rad)</i> | Θ_2 | 1.242 |
| <i>Ángulo máximo de giro de la sección 3 (rad)</i> | Θ_3 | 1.242 |
| <i>Ángulo máximo de giro de la sección 4 (rad)</i> | Θ_4 | 0.828 |

Para comenzar con el desarrollo, es necesario analizar el caso más desfavorable de análisis de cargas. Estos cálculos servirán más adelante para determinar qué tipo de motor PaP va a emplearse.

La única carga a la que se somete el brazo robótico es su propio peso, aunque se le puede añadir una pequeña carga extra situada en el extremo para futuros utillajes que se puedan instalar. Hacer los cálculos con esta carga adicional nos asegura un margen de

seguridad a la hora de instalar un utillaje o de manipular con unas pinzas objetos externos al robot que supongan un peso adicional en el extremo.

La carga del extremo se ha fijado en 100 g, que abarca la masa media de un utillaje (30 g los más pesados) más la de un objeto externo de hasta 80 g en algunos casos.

Se conoce el peso de cada disco, cinco gramos, y la altura máxima de los discos, 4.8 mm que se aproximan a cinco milímetros por las rugosidades de las piezas.

El caso más desfavorable se corresponde con la situación en la que el brazo robótico se encuentra en una posición completamente horizontal. En dicha posición el par generado es máximo, pues las masas de las secciones y del extremo se encuentran lo más alejadas posible de la base del brazo.

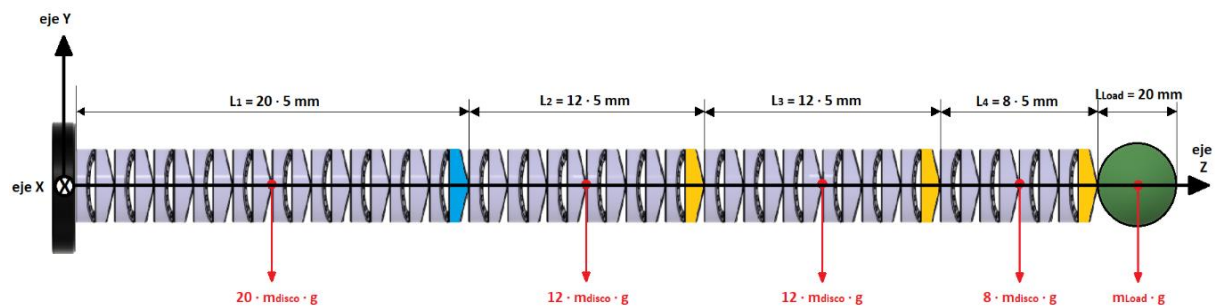


Ilustración 27. Diagrama de fuerzas en el brazo completo

Las longitudes de las secciones resultan $L_1 = 100$ mm, $L_2 = 60$ mm, $L_3 = 60$ mm y $L_4 = 40$ mm, lo cual implica una longitud total de 260 mm que entra dentro de los requisitos mencionados anteriormente. Sus masas son 10, 6, 6 y 4 gramos respectivamente. Sabiendo que $m_{load} = 100$ g, suponemos una longitud media de 20 mm para simular el posible utillaje colocado en el extremo.

Partiendo de esta situación, la unión de las secciones 1 y 2 será la zona que soporte más par, por lo que se reduce el análisis a este punto:

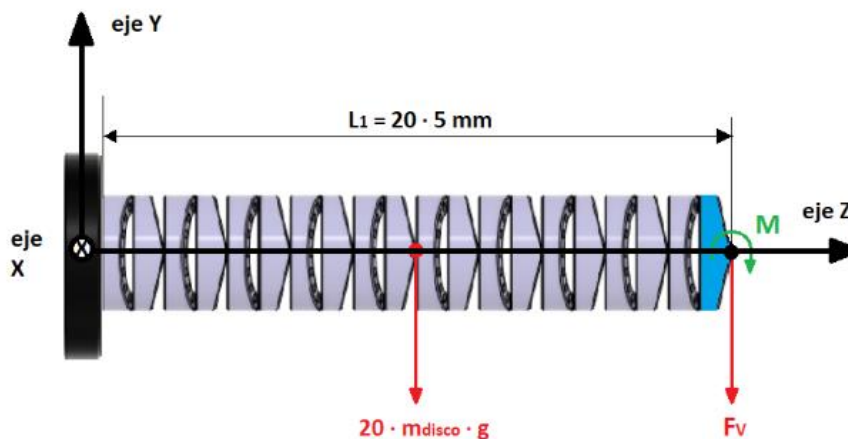


Ilustración 28. Reducción de fuerzas

F_v y M son la fuerza y el par que los cables que generan el movimiento deberán compensar. Estos esfuerzos son calculados de la siguiente manera:

$$F_v = (6 + 6 + 4 + m_{load}) \cdot g \cdot 10^{-3} = 1.1368 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 M &= (6 + 6 + 4 + 1) \cdot 10^{-3} \cdot m_{load} \cdot g + (6 + 6 + 2) \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot g + (6 + 3) \\
 &\quad \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot g + 3 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot g \\
 &= 0.1666 + 0.0055 + 0.0053 + 0.0018 = 0.1792 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

Los cables mencionados antes van a estar distribuidos equitativamente en los discos a lo largo de una circunferencia de 14.5 mm de diámetro y paralelamente al eje longitudinal del brazo robótico.

La distancia que hay desde los cables al eje de giro determina la tensión máxima que pueden soportar. El número de agujeros para cables de este prototipo es 16, que únicamente es múltiplo de cuatro, por tanto, para determinar esta fuerza máxima, se distinguen dos disposiciones de cuatro cables en una sección diferentes.

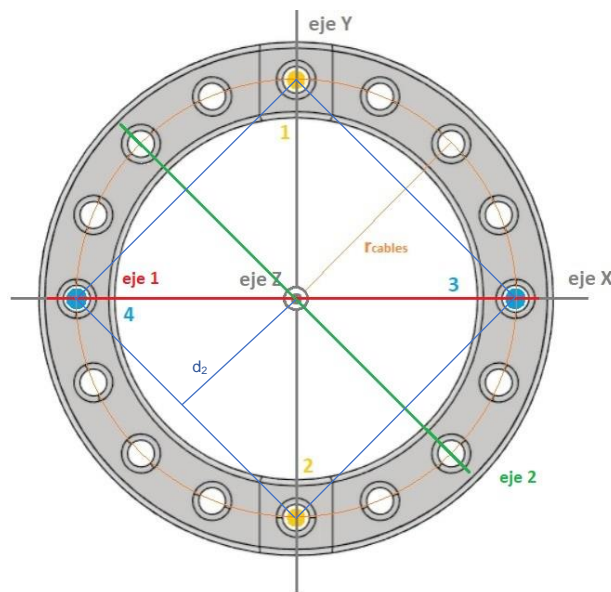


Ilustración 29. Distribución de cuatro cables y ejes de giro

Como se muestra en la figura anterior, para un mismo r_{cables} , hay dos posibles ejes de giro. En el caso de giro respecto al eje 1 (o su perpendicular), actúan los cables 1 y 2 de manera opuesta (o los cables 3 y 4). En el caso de giro respecto al eje 2 o su perpendicular, los cables actúan por parejas, pudiéndose agrupar los cables 1 y 3 frente al 2 y 4, o los cables 1 y 4 frente al 2 y 3.

- **Giro respecto al eje 1**

En esta situación, el par generado por los cables 1 y 3 en el eje 1 es:

$$M_1 = T \cdot r_{cables}$$

- **Giro respecto al eje 2**

En esta otra situación, el par equivalente es generado únicamente por un cable:

$$M_2 = 2 \cdot T \cdot d_2 = 2 \cdot T \cdot r_{cables} \cdot \cos 45 = \sqrt{2} \cdot T \cdot r_{cables}$$

Como se puede observar, el caso más desfavorable es el giro en torno al eje 2, pues es la situación en la que se genera una tensión mayor.

3.5. Componentes, rediseño e impresión 3D

- **Brazo robótico**

El brazo robótico está formado por dos tipos de discos diferentes. Cada una de las secciones estará compuesta por $N_i - 1$ discos estándar con 16 agujeros pasantes y, como disco final, una modificación de éstos, que consiste en la adición de 16 agujeros en la cara lateral para la posterior fijación del extremo de los cables.



Ilustración 30. Vista superior de un disco (válida para ambos tipos).

En los estudios previos realizados en CAR, tanto los discos estándar como los discos de final de sección tenían un diámetro (\varnothing_a) de 1.5 mm para las guías de los cables. Teniendo en cuenta que la diferencia entre el diámetro exterior y el interior es de cinco milímetros, los agujeros de los cables estaban rodeados por un margen de medio milímetro.

Este pequeño grosor corría el riesgo de romperse a causa de la fuerza que ejercen los cables en el final de sección o por el rozamiento que se genera dentro de las guías.

Como solución se rediseñaron las piezas con un $\varnothing_a = 0.9$ mm, siempre teniendo presente que reducir demasiado este diámetro puede causar complicaciones en la posterior construcción y aumentar en gran medida el rozamiento interior. Este diámetro proporciona el margen mínimo para poder pasar los cables sin dificultad durante la construcción.



Ilustración 31. Vista lateral de un disco estándar.

- **Distribuidor de cables**

Esta pieza se ha diseñado para conseguir una distribución de los cables desde la base del brazo robótico lo más adaptada posible a la posición en la que se encuentran sus motores correspondientes.

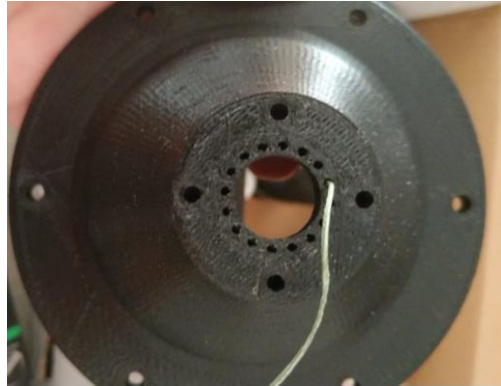


Ilustración 32. Parte superior del distribuidor de cables

Tiene forma de embudo invertido y conduce los cables desde la parte superior por el interior de la pared de la pieza hasta la base, donde posteriormente se unirá con el banco de motores.

- **Banco de motores**

Está compuesto por tres piezas idénticas con forma de prisma hexagonal. Este diseño está pensado para que la distribución de motores se haga en tres pisos diferentes con la combinación deseada sin que influya la forma del banco de motores ni su posterior montaje.

Cada una de las bases hexagonales que componen el banco de motores tiene seis agujeros, uno en cada una de sus caras, para acoplar en ellos cada uno de los motores.



Ilustración 33. Montaje de un motor y su polea en una de las bases

En total hay 18 posibles acoplamientos de motores. Para este proyecto, únicamente se utilizarán 16 de los acoples, uno por cada cable, quedando dos libres que podrían emplearse en un futuro para el movimiento de una herramienta en el extremo del brazo robótico.

- **Poleas**

Las poleas han sido diseñadas en un tamaño lo suficientemente reducido como para que permita su manipulación en el interior de las bases del banco de motores.

Están compuestos de un cilindro hueco dentro del cual se introduce el eje del motor PaP, un avellanado superior que dificulta que el cable enrollado alrededor del cilindro se salga, y una base más ancha en la que hay dos agujeros pasantes y un alojamiento para una tuerca.

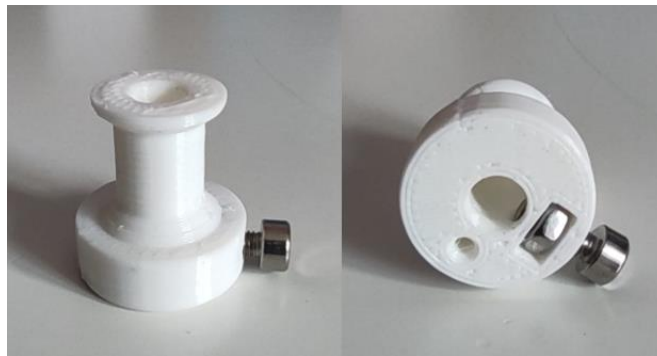


Ilustración 34. Diferentes vistas de las poleas empleadas

De los dos agujeros pasantes, el más pequeño y vertical servirá para anudar el comienzo del cable que posteriormente se enrollará. Por otro lado, el grande se utilizará junto con la tuerca para alojar un tornillo que sirva como prisionero para sujetar el eje del motor.

- **Soporte**

Se ha diseñado en 3D un soporte sobre el que poder colocar el banco de actuadores sin interferir con los cables de los motores PaP. Se han añadido refuerzos para generar resistencia y que el material no se parta por el peso. De esta manera, se podrá tener el robot colocado en posición totalmente horizontal para trabajar con él.



Ilustración 35. Robot colocado sobre el soporte

3.6. Materiales

Debido a la precisión requerida en la impresión 3D de los discos que componen el robot, se ha optado por encargar a la empresa Proto Labs® la impresión de éstos. El tipo de material empleado para estas piezas es Nylon PA 12 blanco sinterizado por láser.



Ilustración 36. Bobina de Nylon PA12 Blanco. Fuente: <https://www.3djake.es/fiberlogy/nylon-pa12-white>

Por otro lado, el distribuidor de cables, las poleas, las bases del banco de actuadores y el soporte, han sido impresas por la Asociación de Estudiantes RESET utilizando como material PLA Negro. En el caso del soporte, se cambió a un color más llamativo para destacar que no forma parte del robot.



Ilustración 37. Bobina de PLA Negro. Fuente: <https://www.impresoras3d.com/filamento/pla/>

Para la actuación por cables se ha decidido emplear dos tipos diferentes de hilos de pescar para poder tener un punto de ensamblaje de los cables entre el banco de actuadores y el robot en caso de que sea necesario cambiar uno de los cables o acoplar un brazo robótico diferente.



Ilustración 38. Tipos de hilo empleados para la construcción. Fuente: <https://www.amazon.es/>

Dado que en la parte del banco de actuadores los cables sufrirán más por estar continuamente enrollándose y desenrollándose en las poleas, el cable empleado en esta fase será más grueso y resistente que el que recorrerá el brazo robótico.

Ambos cables se unirán entre ellos mediante una argolla metálica y nudos de pescar que funcionen bien cuando se aplica tensión en ellos.



Ilustración 39. Muestra del nudo empleado con los cables

Como protección ante posibles roturas de los cables por causas exteriores, se ha recubierto el brazo robótico con una malla elástica normalmente empleada como cubre cables. Se busca que aporte rigidez, pero sin oponer resistencia al movimiento natural del robot.



Ilustración 40. Malla cubre cables. Fuente: <https://computacion.mercadolibre.com.ar/cables-hubs-usb/cables/mallas-cubre-cables/>

Finalmente, los motores elegidos como actuadores son unos motores PaP NEMA17 de 0.48 N.



Ilustración 41. Modelo de motor PaP utilizado en el proyecto

Como se puede comprobar a continuación, partiendo de los cálculos realizados para el diseño, se dispone de un factor de seguridad de aproximadamente cuatro, lo cual permitiría en un futuro la incorporación de más discos en las secciones o el acople de una herramienta más pesada en el extremo del robot.

$$M_1 = 0.1792 \text{ N} \cdot \text{m} = T \cdot r_{\text{cables}} \rightarrow T = 24.72 \text{ N}$$

$$M_{\text{motor}} = T \cdot r_{\text{polea}} = 24.72 \cdot 4.5 \cdot 10^{-3} = 0.11 \text{ N} \cdot \text{m}$$

3.7. Construcción

A continuación, se va a resumir brevemente el paso a paso de la construcción del *Pylori-I*.

En primer lugar, con la ayuda de un “enhebrador”, se introducen uno a uno los cables por cada uno de los discos. Al llegar al final de la primera sección, cuatro de los cables deberán anudarse en el último disco, y habrá que tener en cuenta el desfase de la siguiente sección a la hora de empezar a introducir los cables por los discos de ésta.

Este proceso se realiza de igual manera en las sucesivas secciones, llegando únicamente cuatro cables al extremo final del robot.

El siguiente paso es guiar los cables desde la base del robot a través del distribuidor de cables y recubrir el brazo robótico con la malla elástica.



Ilustración 42. Brazo robótico antes y después de ser recubierto por la malla

Una vez sujeta la malla elástica en la base del brazo robótico, se procede con la unión entre los dos tipos de cable y entre el cable más grueso y las poleas de la manera que se ha descrito en el apartado de materiales.

Después, se instala la base de actuadores superior. Se extraen cinco de los cables con poleas por los agujeros para poder fijarlos a sus motores correspondientes y, finalmente, atornillar éstos a la base. Se procede de igual manera con las siguientes dos bases, extrayendo seis cables en la segunda, y cinco en la última.

La extracción de los cables mencionada se ha hecho siguiendo una distribución de motores que guarde una longitud de cable desde la polea hasta el nudo correspondiente lo más parecida posible para los 16 cables.

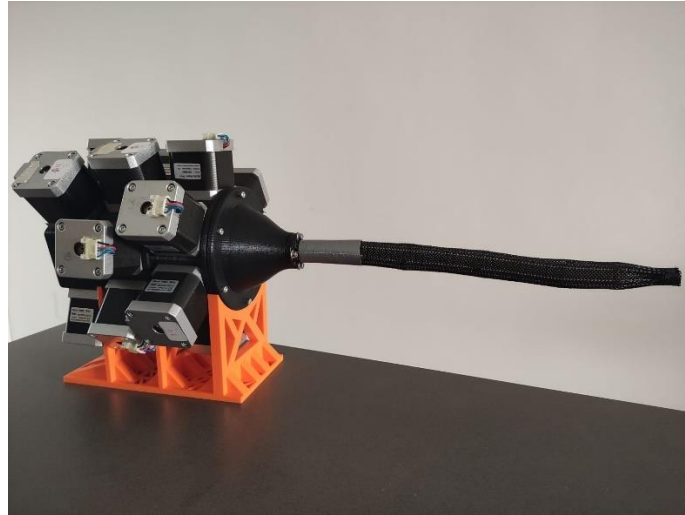


Ilustración 43. Resultado final del montaje.

De esta manera, en la base más cercana al brazo robótico, se encontrarán los cuatro motores pertenecientes a la última sección y uno de la tercera. En la base del medio, se atornillarán los motores restantes de la tercera sección junto a otros tres de la segunda. Y en la primera base, se hallarán los motores correspondientes a la primera sección junto con el cuarto de la segunda sección.

Finalmente, se coloca el robot horizontalmente sobre el soporte en la posición que sitúe el motor número uno en la parte superior del banco de actuadores, y se procede con la conexión al armario eléctrico.

Los cables empleados para estas conexiones se han fabricado de cero para poder asegurar un buen contacto en los conectores y evitar futuros fallos en el funcionamiento.

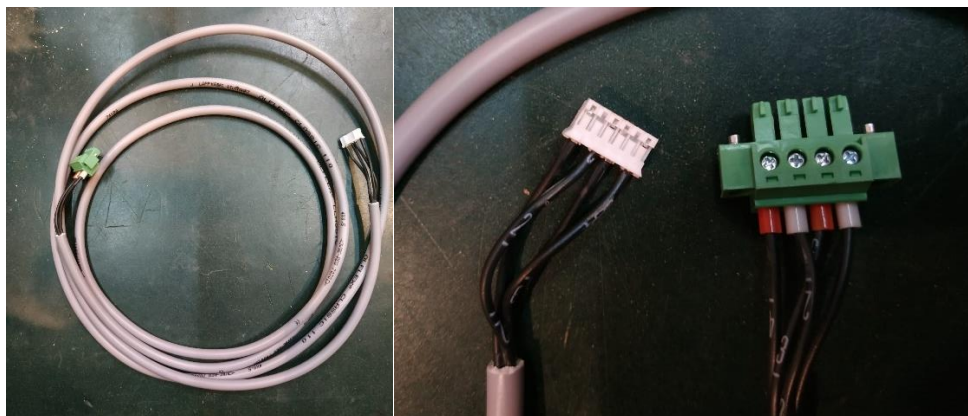


Ilustración 44. Cable y conectores para la conexión al armario

4. CONTROL DE MOVIMIENTO DEL *PYLORI-I*



4. CONTROL DE MOVIMIENTO DEL PYLORI-I

4.1. Estudio de las cinemáticas

Para el control de movimiento del *Pylori-I* se ha utilizado como base el entorno y las cinemáticas del Trabajo de Fin de Grado de Jaime Bravo [17] que se han desarrollado con el programa Matlab.

Dado que, en dicho trabajo, el robot con el que se trabaja en simulación tiene un comportamiento ideal, es decir, sin restricciones ni detección de colisiones, se debe realizar un estudio de las diferentes cinemáticas implementadas para decidir cuál serviría para un comportamiento real del *Pylori-I*.

Tras la implementación del ángulo máximo de giro de cada disco respecto al anterior ($\beta_{\max}=0.23$ rad) como restricción en cada una de las cinemáticas, se ha observado que dos de las tres cinemáticas disponibles dejan de comportarse de manera adecuada.

Como ejemplo, se ha decidido posicionar el extremo del robot en la posición $[-150 \ -100 \ 180]$ para visualizar por qué se descartan las dos cinemáticas que emplean el Método de la Jacobiana.

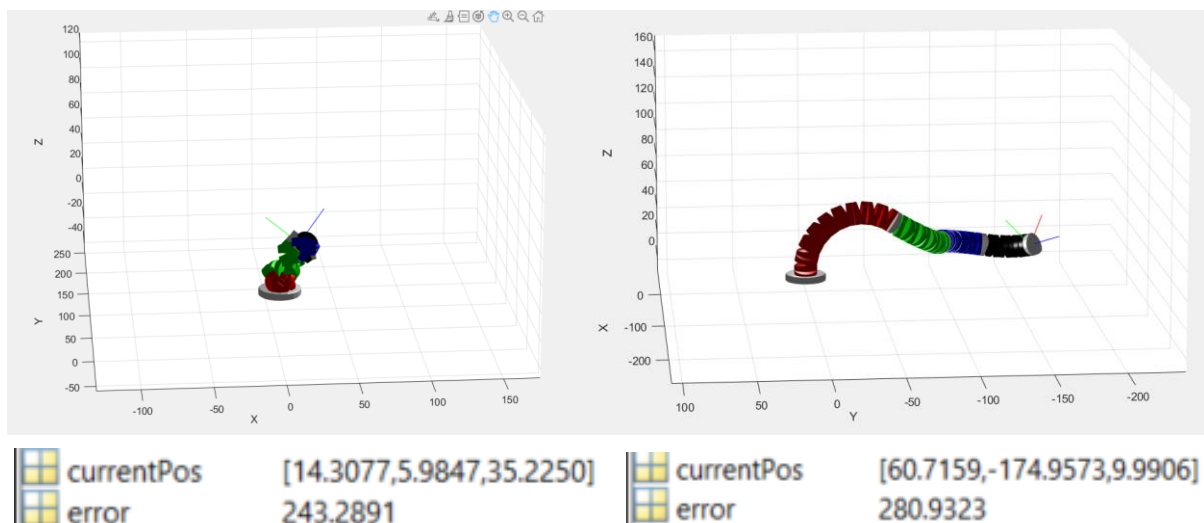


Ilustración 45. A la izquierda, Método de la Jacobiana utilizando como variables los ángulos de los discos. A la derecha, Método de la Jacobiana utilizando como variables los ángulos de las secciones

Aunque a primera vista parezca que la cinemática que emplea los ángulos de las secciones del robot como parámetros para el cálculo de la matriz Jacobiana posiciona el extremo del robot correctamente, si se observa la posición real del extremo junto con el error de posicionamiento existente, se puede concluir que dista mucho de encontrarse en la pose deseada.

Por otro lado, para ese mismo punto, el control cinemático mediante el Descenso del Gradiente genera un error 20 veces más pequeños que en los casos anteriores. De esta manera, se termina que la cinemática que se va a utilizar para el control de movimiento del *Pylori-I* será ésta última.

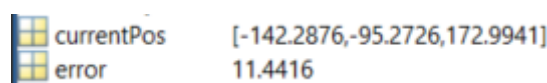


Ilustración 46. Posición real del extremo y error generado con el Método del Descenso del Gradiente.

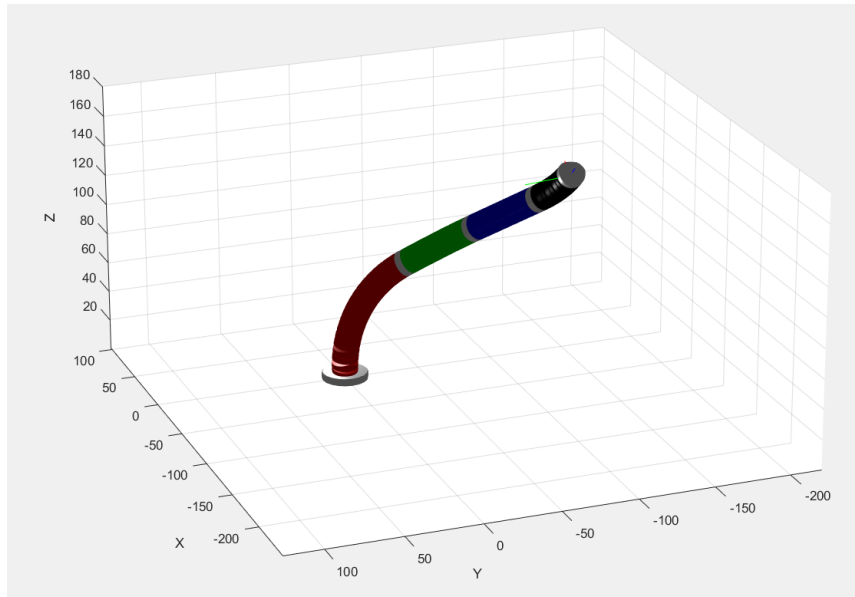


Ilustración 47. Posicionamiento del extremo mediante el Método del Descenso del Gradiente.

4.2. Posicionamiento del extremo

Una vez decidido el control cinemático que se va a utilizar, la llamada a la función empleada para el posicionamiento del extremo queda de la siguiente manera:

```
[newConfig, error, iter] = move(robot, X, Y, Z, 'GradientDescent');
```

Los datos 'X', 'Y', 'Z' que se introducen en la llamada son las coordenadas del punto en el que se desea situar el extremo. Como se verá a continuación, en el caso de las trayectorias, serán vectores de datos.

4.3. Generación de trayectorias

La generación de trayectorias dota al robot de una mayor precisión a la hora de posicionar el extremo y de una mayor maniobrabilidad si se necesita evitar obstáculos.

La función encargada de generar los vectores de coordenadas para cada uno de los puntos que componen la trayectoria es la siguiente:

```
[X, Y, Z] = trayec(type, N, start, goal)
```

En el commando 'type' se puede introducir dos tipos diferentes de trayectoria. Por un lado, se encuentra el tipo 'HELICE', el cual únicamente genera una trayectoria helicoidal determinada para comprobar la flexibilidad del movimiento del robot siguiendo estas ecuaciones:

```
case 'HELICE'
    n=12/N;
    t=8:n:20;

    X = 130*sin(t);
    Y = 130*cos(t);
```

$$Z=10*t;$$

Por otro lado, se encuentra el tipo 'RECT' encargado de generar una trayectoria rectilínea entre dos puntos dados.

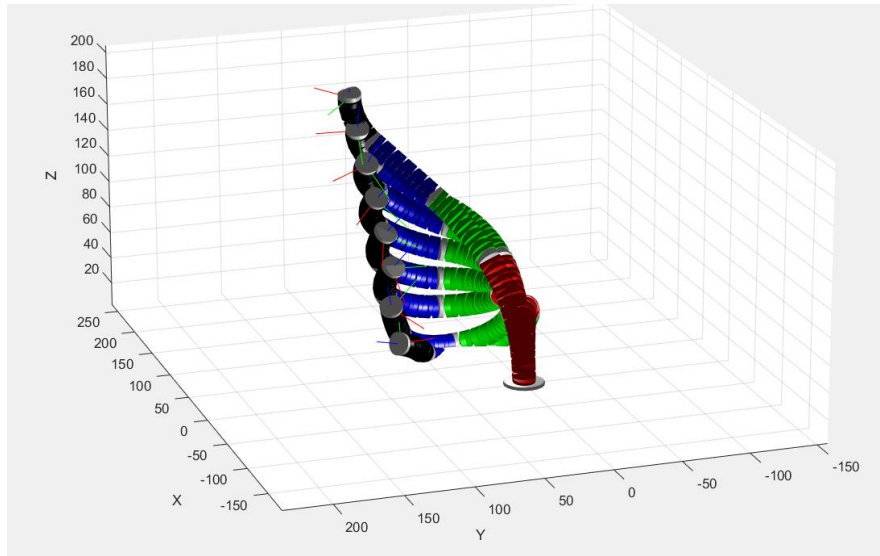


Ilustración 48. Ejemplo de generación de trayectoria rectilínea

El dato 'N' recoge el número de puntos menos uno en los que se quiere dividir la trayectoria. Por último, los datos 'start' y 'goal' sólo se utilizan en el caso de la trayectoria rectilínea. Representan el vector de coordenadas iniciales y finales de la trayectoria respectivamente.

4.4. Detección de colisiones

La detección de colisiones, en lugar de implementarla como una función, se ha decidido añadirla dentro de los atributos y métodos públicos de la clase 'HRRTree'.

Este método compara la posición relativa entre los discos dos a dos, exceptuando los discos contiguos, y detecta si hay colisión entre ellos mediante la creación de mallas a partir del archivo .stl de los discos que conforman el robot.

El código del método implementado se muestra a continuación:

```
%% COLISIONES
function [n,colision] = colisiones (obj, newConfig)
    stl = stlread('Mod_Boro_Triang.stl');

    disco1 = collisionMesh(stl.Points);
    disco2 = collisionMesh(stl.Points);

    colision = {};
    n=0;

    for j=1:obj.TotalLinks-2
        for i=j:obj.TotalLinks-2
            disco1.Pose = getTransform (obj, newConfig, obj.BodyNames{1,j});
            disco2.Pose = getTransform (obj, newConfig, obj.BodyNames{1,i+2});

            if checkCollision(disco1,disco2)==1
```

```

n=n+1;
colision (n,:)={obj.BodyNames{1,j},obj.BodyNames{1,i+2}};
end
end
end
end

```

4.5. Cálculo de longitudes

Para el cálculo de las longitudes de los cables necesarias para el posicionamiento del Pylori-I, hay que tener en cuenta que la elongación de los cables de cada sección depende de la correspondiente a las secciones anteriores.

Por tanto, se debe calcular la longitud de cada cable a su paso por cada sección y sumar cada uno de los resultados para hallar la longitud final. Conociendo la longitud en reposo de cada uno de los cables, se podrá hallar sin dificultad la elongación de cada uno (ΔL_i).

A continuación, se muestra el procedimiento para el cálculo de la longitud de un cable a lo largo de una sección, siendo análogo para el resto de los cables y secciones.

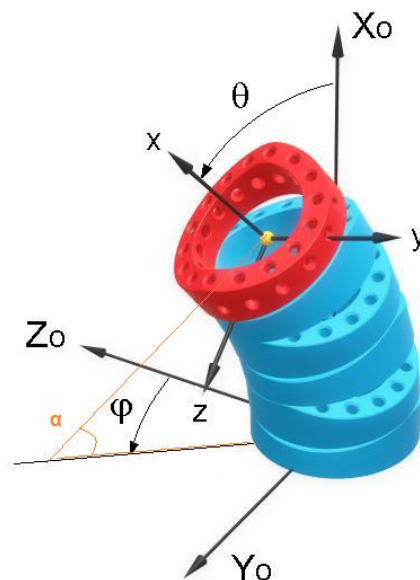


Ilustración 49. Representación de los ángulos θ , ϕ y α de la sección. Fuente: Modificado de [17]

El giro de una sección genera una curvatura en su eje central de radio R y cuyo ángulo formado con el plano horizontal se denomina α . De igual manera, se genera una curvatura con el mismo ángulo por cada uno de los ejes guía de los cables, cuyos radios llamaremos R_{gi} .

Siendo γ los ángulos α representados en la Ilustración 50, los cuales simbolizan el ángulo entre el radio de curvatura R y la posición del cable del que se quiere calcular la longitud, y conocidos r_{cables} , θ y ϕ (los dos últimos los proporciona un método de los implementados en la clase 'HRRTree' en Matlab [17]), se procede con el cálculo de R_g .

$$\beta = \gamma - \phi - \pi$$

$$R_g = R + r_{cables} \cdot \cos \beta$$

$$L = R \cdot \alpha$$

$$\theta = \alpha$$

$$L_g = R_g \cdot \theta = L + r_{cables} \cdot \theta \cdot \cos \beta$$

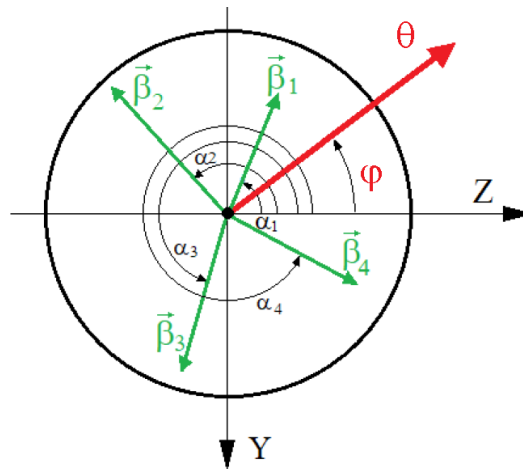


Ilustración 50. Proyección de los vectores rotación de las articulaciones. Fuente: [17]

4.6. Transformación de longitud a pulsos

Una vez calculada la elongación de cada uno de los cables, se llama a la siguiente función proporcionándole un vector que alberga cada una de las elongaciones calculadas.

```
function [pulsos,vel] = long2pulsos(hilos)
% 1600 pulsos/rev
% 28,27 mm/rev
% ~~57 pulsos/mm
% Movimiento en un máximo de 3 sec

for i=1:16
    pulsos(i)= 57*hilos(i);
    vel(i)=abs(pulsos(i))/3;
end
end
```

Mediante proporcionalidad, se puede calcular a partir del ángulo máximo de giro de un disco, los milímetros que el hilo se acorta o alarga por cada revolución del eje del motor correspondiente. En este caso, 28.27 mm/rev. Dado que los motores están configurados para tener 1600 pulsos por revolución, se llega a la conclusión de que, por cada milímetro de elongación, el motor gira aproximadamente 57 pulsos.

4.7. Espacio de trabajo

Inicialmente, se implementó una función en Matlab que calculaba el espacio de trabajo para cualquiera de las cinemáticas de control. A continuación, se mostrarán ejemplos hechos únicamente utilizando la cinemática del Descenso del Gradiente que es la que se ha considerado válida.

En primer lugar, se ha calculado un primer caso en el que se evalúan 1331 puntos dentro de los límites establecidos para el entorno de trabajo, y realizando un máximo de 250 iteraciones como máximo en el cálculo del posicionamiento.

En color azul, se representan los puntos a los que el robot es capaz de llegar con un error de entre tres y diez milímetros. De color verde, se encuentran los puntos con un error de posicionamiento inferior a tres milímetros y, en rojo, aquellos puntos cuyo error sea superior a 10 mm.

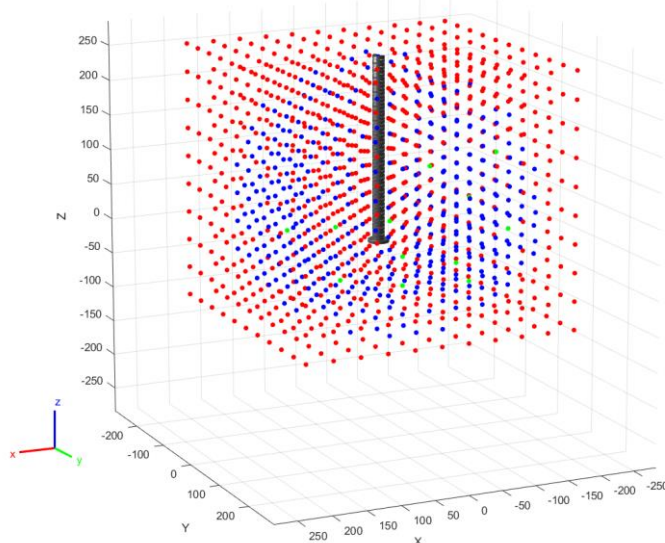


Ilustración 51. Espacio de trabajo evaluado para 1331 puntos y 250 iteraciones

Como se puede observar, apenas se obtienen puntos con errores inferiores a tres milímetros, por lo que se aumenta el número de puntos evaluados a 2520, lo cual significa barrer el entorno de cuatro en cuatro centímetros.

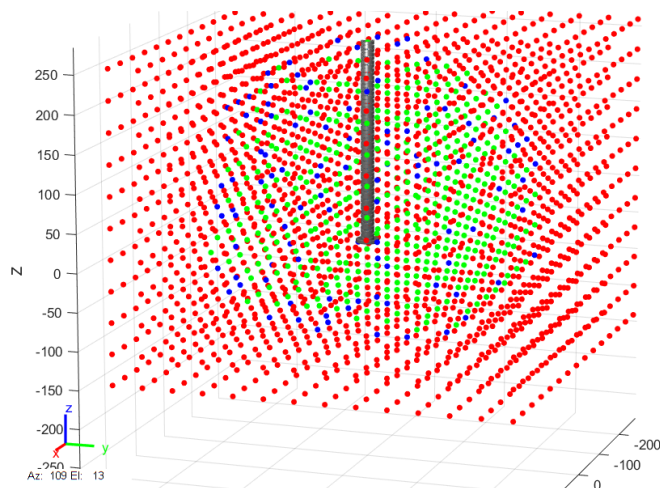


Ilustración 52. Espacio de trabajo evaluado para 2520 puntos y 250 iteraciones

El resultado del análisis mejora significativamente. Teniendo en cuenta que el robot nunca va a ser capaz de acceder a los vértices del espacio que conforma su entorno de trabajo, la densidad de puntos verdes y azules respecto a los rojos se considera adecuada para seguir adelante.

Densidad de puntos verdes: 1.547619e+01 percent
 Densidad de puntos azules: 4.285714e+00 percent
 Densidad de puntos rojos: 8.023810e+01 percent

Ilustración 53. Densidad en porcentaje de cada tipo de punto respecto al total

4.8. Interfaz hombre-máquina

La pantalla principal de la interfaz hombre-máquina (IHM) es la mostrada a continuación.

The screenshot shows the main control interface (IHM) with a blue background. At the top, there is a navigation bar with tabs: CONTROL, ARDUINO, CALIBRACIÓN, COLISIONES, and a plus sign. The main area is divided into several sections:

- Coordenadas:** Three input fields for X (mm), Y (mm), and Z (mm), each with a value of 0 and a small up/down arrow.
- Cinemática:** Two radio buttons: 'Descenso del gradiente' (selected) and 'Matriz Jacobiana (discos)'. There is also a radio button for 'Matriz Jacobiana (secciones)'.
- GENERAR TRAYECTORIA:** Two radio buttons: 'Rectilínea' (selected) and 'Hélice'.
- Buttons:** 'SIMULAR', 'RESET', and 'ENVIAR'.
- Posición real:** Three input fields for X, Y, and Z, each with a value of 0 and the unit 'mm'.
- Error:** A horizontal scale from 0 to 5 mm, with a red indicator at 0.
- Punto válido:** A green circular indicator.

Ilustración 54. Pantalla principal de control de la IHM

En esta pantalla se introducen las coordenadas de posicionamiento y se selecciona el tipo de control cinemático deseado. Cuando se pulsa en el botón 'SIMULAR', la IHM genera una simulación que muestra el posicionamiento del robot en 3D, muestra en pantalla la posición real en la que se encuentra el TCP, y el error de posicionamiento existente. Además, si el error es demasiado grande o se genera una colisión, el piloto 'Punto válido' cambiará a color rojo.

En la segunda pestaña, se encuentra la pantalla utilizada para la conexión Matlab-Arduino. Una vez seleccionado el *puerto COM* y el *baudrate*, se pulsa en 'CONECTAR' y si el procedimiento se ha realizado de manera correcta, el piloto 'CONEXIÓN' cambiará a color verde y en el botón 'CONECTAR' pasará a poner 'DESCONECTAR'.

The screenshot shows the connection interface (IHM) with a blue background. At the top, there is a navigation bar with tabs: CONTROL, ARDUINO, CALIBRACIÓN, COLISIONES, and a plus sign. The main area contains:

- Puerto:** A dropdown menu.
- Baudrate:** A dropdown menu.
- Buttons:** 'CONECTAR' and 'REFRESH COM'.
- Conexión:** A circular indicator.

Ilustración 55. Pantalla de conexión Matlab-Arduino de la IHM

La tercera pestaña se ha creado para automatizar el proceso de calibración, pudiendo seleccionar el motor que se desee calibrar e introducir el número de pulsos que debe girar el motor. Una vez terminado el proceso con todos los motores, se pulsa el botón 'FIJAR HOME' para que los motores consideren esa posición actual como *HOME* o posición de reposo.

Ilustración 56. Pantalla de calibración de la IHM

Finalmente, en la cuarta pestaña, se muestra una tabla en la que aparecerán los discos implicados en las colisiones generadas tras la simulación del posicionamiento deseado, así como el número total de colisiones que se hayan producido.

| Disco 1 | Disco 2 |
|---------|---------|
| L2.8 | L3.12 |
| L2.8 | L4.1 |
| L2.8 | L4.2 |
| L2.9 | L3.12 |
| L2.9 | L4.1 |
| L2.9 | L4.2 |
| L2.9 | L4.3 |
| L2.10 | L3.12 |
| L2.10 | L4.1 |
| L2.10 | L4.2 |
| L2.10 | L4.3 |
| L2.10 | L4.4 |
| L2.11 | L4.1 |
| L2.11 | L4.2 |
| L2.11 | L4.3 |
| L2.11 | L4.4 |
| L2.12 | L3.2 |
| L2.12 | L4.2 |
| L2.12 | L4.3 |
| L2.12 | L4.4 |
| L3.1 | L3.3 |
| L3.2 | L3.4 |
| L3.3 | L3.5 |
| L3.4 | L3.6 |
| L3.5 | L3.7 |

Ilustración 57. Pantalla de colisiones y ejemplo

5. HARDWARE DE CONTROL



5. HARDWARE DE CONTROL

5.1. Armario eléctrico

La utilización de este armario eléctrico se basa en el objetivo de controlar los 16 motores paso a paso que actúan en este robot.

El armario permite controlar hasta un total de 18 motores PaP con una corriente máxima de 3.5 A por motor.



Ilustración 58. Armario eléctrico para 18 motores PaP

Los dispositivos de control instalados en su interior son *drivers TB6600*, los cuales son controlados mediante un *Arduino Due* que recibe los comandos de control mediante Serial.

Los switches laterales de los *TB6600* dan la posibilidad de configurar la corriente y los micropasos con los que se controlarán los diferentes motores PaP. Dichos parámetros, quedan establecidos según las siguientes tablas:

Tabla 2. Configuración de los micropasos para un motor de 200 pasos

| Micro Step | Pulse/rev | S1 | S2 | S3 |
|------------|-----------|-----|-----|-----|
| NC | NC | ON | ON | ON |
| 1 | 200 | ON | ON | OFF |
| 2/A | 400 | ON | OFF | ON |
| 2/B | 400 | OFF | ON | ON |
| 4 | 800 | ON | OFF | OFF |
| 8 | 1600 | OFF | ON | OFF |
| 16 | 3200 | OFF | OFF | ON |
| 32 | 6400 | OFF | OFF | OFF |

Tabla 3. Configuración de los de la corriente para un motor de 200 pasos

| Current (A) | PK Current (A) | S4 | S5 | S6 |
|-------------|----------------|-----|-----|-----|
| 0.5 | 0.7 | ON | ON | ON |
| 1 | 1.2 | ON | OFF | ON |
| 1.5 | 1.7 | ON | ON | OFF |
| 2.0 | 2.2 | ON | OFF | OFF |
| 2.5 | 2.7 | OFF | ON | ON |
| 2.8 | 2.9 | OFF | OFF | OFF |
| 3.0 | 3.2 | OFF | ON | OFF |
| 3.5 | 4.0 | OFF | OFF | OFF |

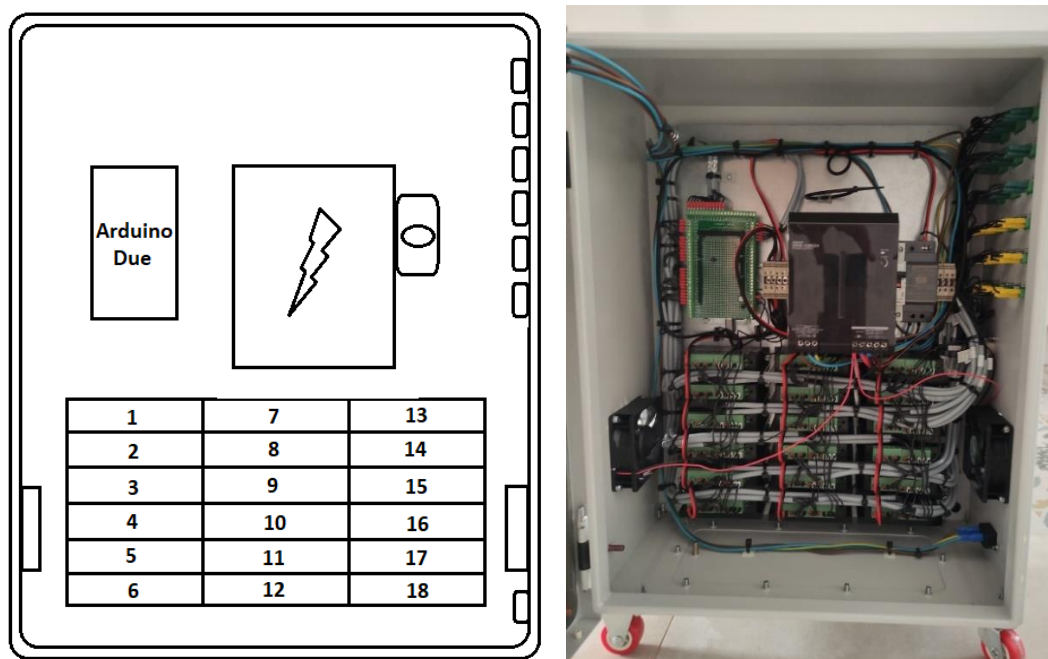


Ilustración 59. Interior del armario eléctrico y distribución de drivers

La configuración elegida para los motores del *Pylori-I* es *OFF-ON-OFF-ON-OFF-OFF* (S1-S2-S3-S4-S5-S6), es decir, un *microstep* de 8 y una corriente de 2 A. Dado que los motores son de 200 pasos, tras realizar el *microstepping*, pasarán a tener 1600 pulsos/revolución.

Los motores PaP se conectan al armario mediante conectores de cuatro pines de la siguiente manera:

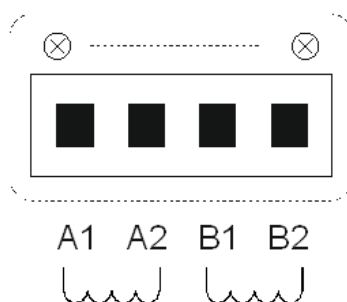


Ilustración 60. Conexión de los motores PaP al armario

La numeración de los 18 conectores en la cara lateral derecha es la que se muestra en la siguiente ilustración:

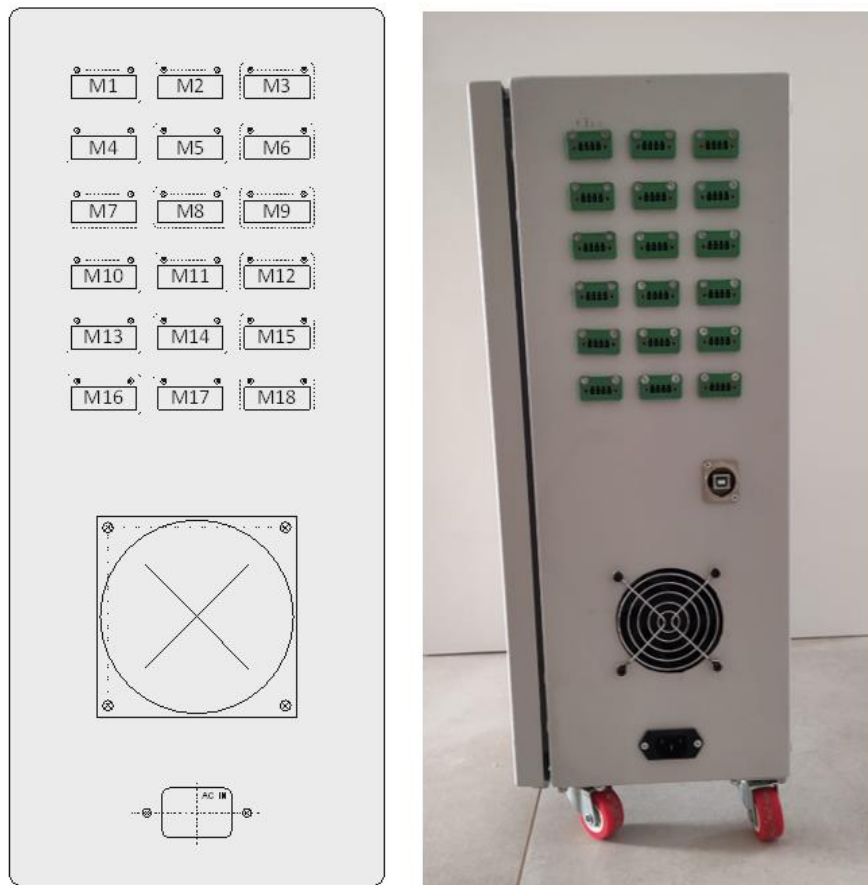


Ilustración 61. Distribución de los conectores

5.1.1. Puesta en marcha del armario

El primer paso es conectar los 16 motores y enchufar el armario eléctrico a la corriente. Una vez conectados todos los cables correctamente, se procede con la puesta en marcha.

El armario cuenta con diferentes protecciones que se deben tener en cuenta a la hora de ponerlo en marcha. En primer lugar, será necesario abrir el armario y cerciorarse de que el interruptor magnetotérmico situado en su interior está activado. Una vez realizada esta comprobación, es recomendable cerrar el armario.

El siguiente paso será comprobar que la seta de emergencia no está pulsada. En caso de estarlo, la seta de emergencia se libera girándola sobre sí misma.

Por último, se colocará el interruptor de encendido en posición *ON*. Automáticamente, el armario arrancará y los ventiladores comenzarán a funcionar. A partir de aquí, será posible enviar los comandos mediante *Serial*.

5.1.2. Tabla de equivalencia

La tabla mostrada a continuación relaciona los pines del *Arduino Due* con los *drivers TB6600*:

Tabla 4. Correspondencia entre pines de Arduino y señales de los drivers

| Arduino PIN | Función | Motor |
|----------------|---------|----------|
| 13 | PUL+ | 1 |
| 12 | DIR+ | 1 |
| 11 | PUL+ | 2 |
| 10 | DIR+ | 2 |
| 9 | PUL+ | 3 |
| 8 | DIR+ | 3 |
| 7 | PUL+ | 4 |
| 6 | DIR+ | 4 |
| 5 | PUL+ | 5 |
| 4 | DIR+ | 5 |
| 3 | PUL+ | 6 |
| 2 | DIR+ | 6 |
| 14 | PUL+ | 7 |
| 15 | DIR+ | 7 |
| 16 | PUL+ | 8 |
| 17 | DIR+ | 8 |
| 18 | PUL+ | 9 |
| 19 | DIR+ | 9 |
| 20 | PUL+ | 10 |
| 21 | DIR+ | 10 |
| 22 | PUL+ | 11 |
| 23 | DIR+ | 11 |
| 24 | PUL+ | 12 |
| 25 | DIR+ | 12 |
| 26 | PUL+ | 13 |
| 27 | DIR+ | 13 |
| 28 | PUL+ | 14 |
| 29 | DIR+ | 14 |
| 30 | PUL+ | 15 |
| 31 | DIR+ | 15 |
| 32 | PUL+ | 16 |
| 33 | DIR+ | 16 |
| 34 | PUL+ | 17 |
| 35 | DIR+ | 17 |
| 36 | PUL+ | 18 |
| 37 | DIR+ | 18 |
| 48 | ENA | 1;2;3 |
| 49 | ENA | 4;5;6 |
| 50 | ENA | 7;8;9 |
| 51 | ENA | 10;11;12 |
| 52 | ENA | 13;14;15 |
| 53 | ENA | 16;17;18 |

5.2. Arduino

El control de los motores se realiza enviando comandos mediante el *Serial* de Arduino. Para iniciar el movimiento es necesario establecer la comunicación con los siguientes parámetros:

| Parámetro | Valor |
|-----------------|---------------|
| Baudrate | 250000 |
| DataBits | 8 |
| StopBits | 1 |
| Parity | None |

Una vez iniciado el *puerto Serial*, el control se realizará siguiendo una sintaxis básica para el envío de mensajes, la cual tiene la siguiente forma:

[Motor;Comando;Arg1;Arg2;]

Como se puede observar, el inicio y el final del mensaje están marcados por el carácter “[” y “]” respectivamente, y después del último dato hay también un “;”.

El parámetro *Motor* selecciona el motor al cual va dirigido el comando, por lo que podrá tomar valores desde 1 a 18.

El parámetro *Comando* puede tomar 4 valores, los cuales determinan la acción que se llevará a cabo. Dependiendo del comando, serán necesarios los argumentos o no. Todo ello se recoge en la siguiente tabla.

Tabla 5. Descripción de los comandos disponibles

| Comando | Acción | Arg1 | Arg2 | Descripción |
|---------|---------------------|----------------------------|--------------------------|---|
| 0 | Disable | | | Deshabilita el motor correspondiente* |
| 1 | Speed Mode** | Velocidad (Steps/s) | | Modo velocidad que establece los pulsos por segundo a los que se moverá el motor. Un valor negativo invierte el sentido de giro. No se recomiendan velocidades superiores a 4000 steps/s |
| 2 | Servo Mode | Velocidad (Steps/s) | Posición (Pulsos) | Modo servo donde se fija una posición objetivo y se condiciona la velocidad del recorrido |
| 3 | Set Position | Posición | | Establece la posición actual al valor que se le indica. La posición al inicio del programa es 0 |

*Los motores se deshabilitan por grupos de 3, por lo que no es posible deshabilitar independientemente cada motor. Para consultar que motores se activan y desactivan con la misma señal, consultar la tabla de correspondencia al final del documento.

**Pese a estar en modo velocidad, los pulsos desplazados son contabilizados, por lo que si posteriormente se utiliza el modo servo habrá que tener esto en cuenta.

5.2.1. Ejemplo

| | |
|---|--|
| [2;1;2000;] | //Motor 2 se comienza a mover a 2000 pulsos/s |
| [2;1;-1000;] pulsos/s | //Motor 2 invierte su sentido de giro y se mueve a 1000 pulsos/s |
| [2;1;0;] | //Se detiene el motor 2 |
| [2;3;1500;] pulsos. | //Se establece la posición actual del motor 2 a 1500 pulsos. |
| [2;2;2000,8000;] 2000 pulsos/s. | //Se mueve hasta la posición 8000 (desde la 1500) a 2000 pulsos/s. |
| [2;0;] | //Se deshabilita motor 2, deja de llegar corriente al motor |

5.3. Relación longitud-pulsos

Para transformar la longitud de acortamiento o alargamiento que nos proporciona Matlab de cada uno de los cables, hay que tener en cuenta las dimensiones de las poleas descritas anteriormente en el diseño.

Estas poleas tienen un diámetro de 9 mm en el eje central, por lo que la longitud recogida por cada vuelta dada en la polea es

$$2\pi \cdot 4.5 = 28.2743 \text{ mm}$$

Sabiendo que a cada motor le corresponden 1600 pulsos por revolución según el ajuste de *microstepping* explicado recientemente, y utilizando proporcionalidad, obtenemos que 1 mm recogido corresponde a 56.588 pulsos, los cuales se han redondeado a 57 en el código.

6. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS



6. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

6.1. Espacio de trabajo

El espacio de trabajo físico ha sido construido mediante perfiles de aluminio, piezas diseñadas en 3D, carros V-Slot y láseres. Las dimensiones han seguido el resultado obtenido en el cálculo del espacio de trabajo con Matlab, permitiendo al robot moverse vertical y horizontalmente a lo largo de 400 mm.

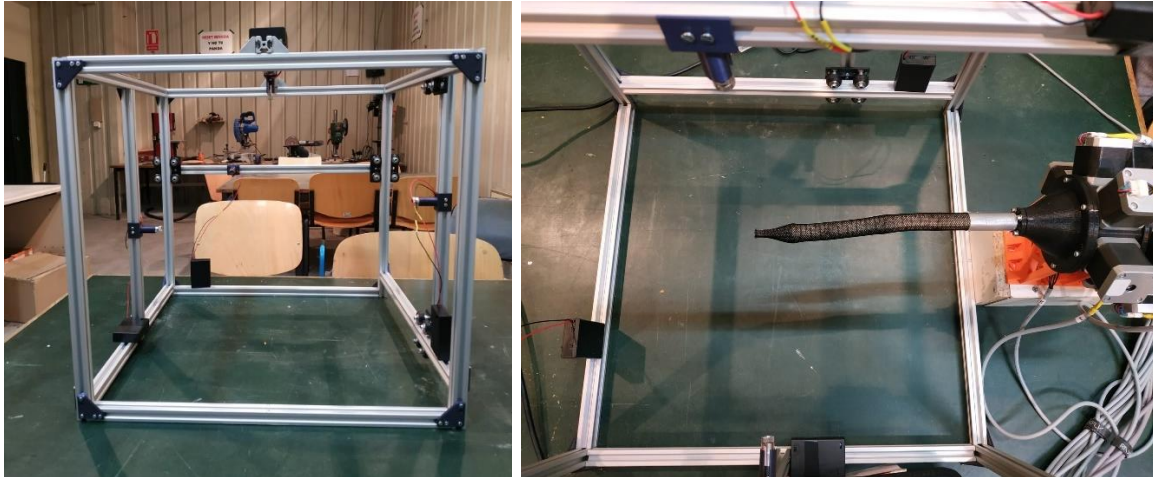


Ilustración 62. Visión general del espacio de trabajo y posicionamiento del Pylori-I en el mismo

En los perfiles que componen el espacio de trabajo se han instalado cuatro láseres. Dos de ellos, son láseres lineales y se encuentran fijos en la estructura. Son aquellos que se utilizarán para corroborar que la calibración es correcta.

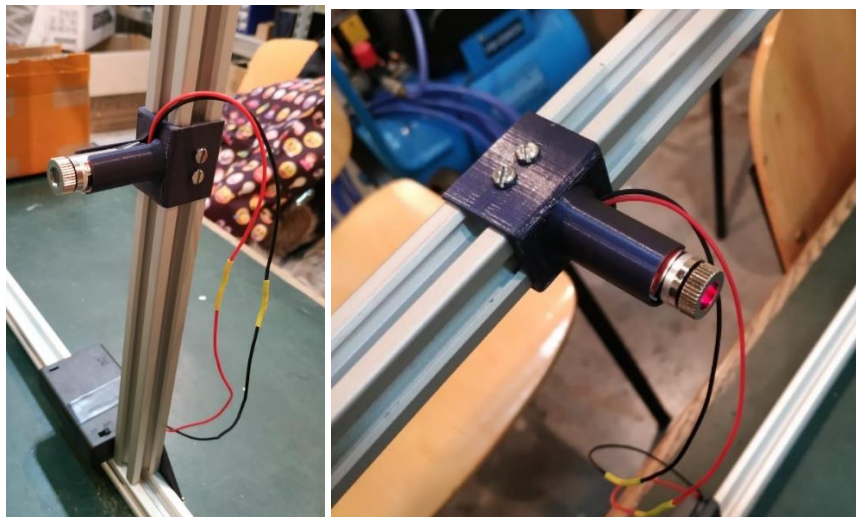


Ilustración 63. Láseres lineales

Por otro lado, los dos restantes, son láseres de punto que se desplazarán con la ayuda de los carros V-Slot hasta apuntar al TCP. En ese instante, teniendo claro el origen de coordenadas y los ejes de referencia del espacio de trabajo, se procede con la obtención de las coordenadas X, Y, Z de la posición en la que se encuentra el extremo del robot.

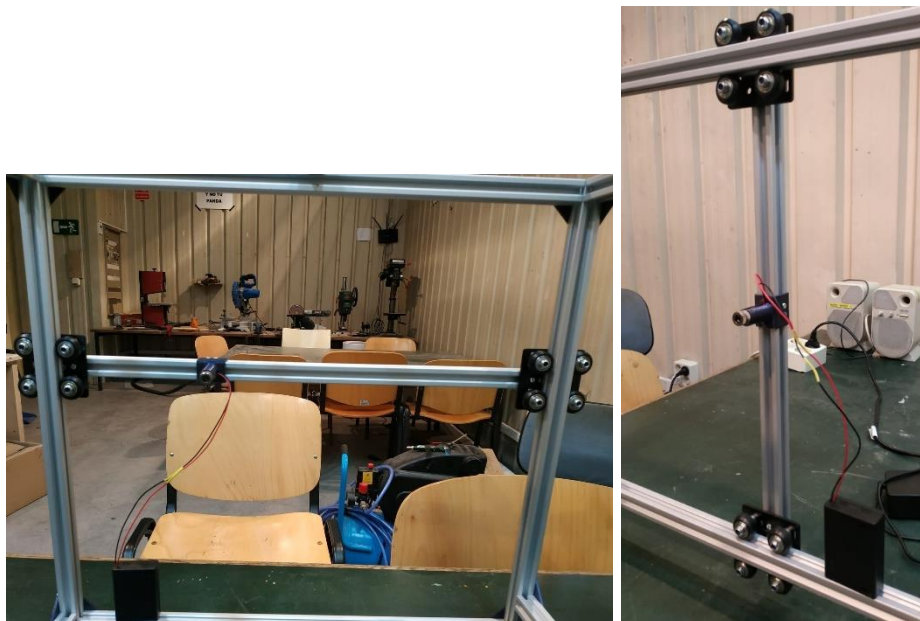


Ilustración 64. Láseres de punto y carros V-Slot

6.2. Puesta en marcha

La puesta en marcha del robot consiste, básicamente, en la calibración de éste. Para llevar a cabo este proceso, se ha diseñado en Matlab la siguiente función:

```
function calibrarArduino(Arduino,modo,motor,pul);
```

Los modos implementados dentro de esta función son cuatro. El modo '0' establece la posición actual de todos los motores como el HOME (recomendable realizar este paso antes de comenzar a calibrar).

El modo '1' permite mandar a Arduino un número de pasos a un motor concreto. De esta manera se tensará cada uno de los cables hasta conseguir una posición de reposo alineada con los láseres como se muestra a continuación.

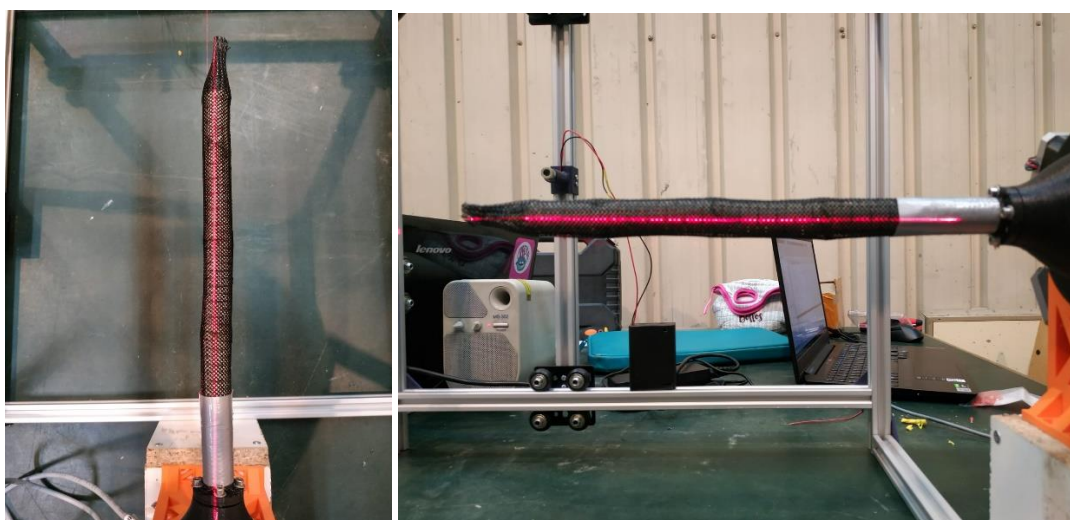


Ilustración 65. Pylori-I completamente alineado tras la calibración

El modo '2' funciona de igual manera que el primero de todos, a excepción de que permite seleccionar de qué motor quieres fijar la posición como HOME.

Finalmente, el modo '3' es el 'RESET'. Envía la posición HOME a todos los motores quedando el robot en la pose de reposo inicial.

6.3. Realización de pruebas

A continuación, se muestran tres tablas diferentes con parte de los experimentos realizados. Se estudian los mismos vectores de coordenadas para diferentes casos.

Tabla 6. Pruebas de posicionamiento del extremo

| Posición del extremo deseada (mm) | | | Posición real (mm) | | | Error (mm) |
|-----------------------------------|------|-----|--------------------|-----|-----|--------------|
| X | Y | Z | X | Y | Z | |
| 104 | 104 | 200 | 65 | 50 | 215 | 68,28 |
| -100 | 100 | 170 | -90 | 70 | 200 | 43,59 |
| 120 | -150 | 200 | 85 | -80 | 190 | 78,90 |
| -70 | -70 | 150 | -90 | -60 | 190 | 45,83 |
| -150 | -100 | 180 | -75 | -55 | 200 | 89,72 |

Tabla 7. Pruebas de posicionamiento mediante trayectoria rectilínea (N = 6)

| Posición final deseada de la trayectoria (mm) | | | Posición final real de la trayectoria (mm) | | | Puntos | Error (mm) |
|---|------|-----|--|------|-----|--------|--------------|
| X | Y | Z | X | Y | Z | | |
| 104 | 104 | 200 | 65 | 60 | 220 | 6 | 62,10 |
| -100 | 100 | 170 | -110 | 75 | 180 | 6 | 28,72 |
| 120 | -150 | 200 | 90 | -105 | 190 | 6 | 55,00 |
| -70 | -70 | 150 | -100 | -40 | 145 | 6 | 42,72 |
| -150 | -100 | 180 | -90 | -120 | 190 | 6 | 64,03 |

Tabla 8. Pruebas de posicionamiento mediante trayectoria rectilínea (N = 12)

| Posición final deseada de la trayectoria (mm) | | | Posición final real de la trayectoria (mm) | | | Puntos | Error (mm) |
|---|------|-----|--|-----|-----|--------|--------------|
| X | Y | Z | X | Y | Z | | |
| 104 | 104 | 200 | 70 | 85 | 180 | 12 | 43,78 |
| -100 | 100 | 170 | -100 | 60 | 190 | 12 | 44,72 |
| 120 | -150 | 200 | 95 | -80 | 200 | 12 | 74,33 |
| -70 | -70 | 150 | -85 | -90 | 170 | 12 | 32,02 |
| -150 | -100 | 180 | -75 | -85 | 190 | 12 | 77,14 |

6.4. Discusión de los resultados

A la vista de los resultados obtenidos, se llega a la conclusión de que el comportamiento físico del *Pylori-I* no es el esperado, ya que el error de posicionamiento es muy superior al obtenido en simulación.

Esta gran diferencia puede estar provocada por la dificultad de corroborar que la tensión de los cables es la adecuada, puesto que no se tiene acceso a ellos. También es posible que la causa sea la distensión progresiva de los cables según avanza el proceso de experimentación, o el propio rozamiento que se genera en las guías de los cables.

Por otro lado, si se observan los datos con detenimiento, se pueden sacar cosas en claro. Por ejemplo, el error de posicionamiento del extremo por lo general es menor si el movimiento se realiza siguiendo una trayectoria rectilínea en lugar de un movimiento directo.

Sin embargo, entre realizar las trayectorias con el doble de puntos intermedios o no, no se aprecian grandes diferencias y el error es mayor en un caso o en otro independientemente de este número. Por tanto, se deduce que este número N no es determinante para estos casos.

7. LÍNEAS FUTURAS



7. LINEAS FUTURAS

Gracias a que el *Pylori-I* se ha construido en la propia Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, es fácil que un futuro alumno retome el proyecto y lo mejore.

Para continuar con un buen desarrollo del *Pylori-I*, se plantean diferentes campos de investigación con los que mejorar el proyecto:

- **Materiales de construcción**

A la vista de los resultados de los experimentos, queda claro que uno de los principales impedimentos para el correcto movimiento del robot son los materiales con los que está construido.

Una posible solución sería cambiar la impresión 3D de los discos por fabricación en aluminio. De esta manera, podrían emplearse cables de acero para el accionamiento sin riesgo de romper los discos, minimizando el rozamiento que actualmente hay entre disco e hilo, y aportándole una mayor resistencia ante grandes tensiones.

Además, dada la consistencia de esta nueva construcción, se podría prescindir de la malla elástica, proporcionando una mayor visión de los cables.

- **Mejora de la IHM**

Actualmente, en la interfaz hombre-máquina es posible hacer la conexión con Matlab-Arduino, pero no el envío de datos de uno a otro.

Como mejora a realizar se podría terminar esa fase de la interfaz cuando los experimentos den resultados satisfactorios, ya que ese ha sido el motivo por el cual no se ha realizado hasta ahora este intercambio de información.

- **Instalación de una herramienta**

En el prototipo actual no se ha instalado ningún tipo de herramienta en el TCP pese a que tanto el banco de motores como el armario eléctrico tienen capacidad para albergar dos motores más.

Como futuro objetivo, cabe la posibilidad de instalar una pinza eléctrica en el extremo para utilizar el robot como un modelo manipulador, o bien una cámara que pueda utilizarse en situaciones de inspección o en entornos relacionados con la medicina.

- **Diseñar un método de calibración y automatizar las mediciones en los experimentos**

Actualmente, dado que se trata de un primer prototipo, el entorno de trabajo en el que se realizan los experimentos es muy simple y poco preciso, ya que se realizan las medidas de manera manual.

Como futura mejora se contempla la posibilidad de realizar estas medidas mediante el análisis de las imágenes que nos proporcionarían dos webcams instaladas en el espacio de trabajo.

Además de esto, el sistema de calibración se realiza 'a ojo' ya que no se tiene un acceso completo a los cables para poder comprobar la tensión a la que están sometidos. Es posible que exista un método que, junto con la utilización de diferentes materiales de construcción, proporcione una calibración fiable y duradera.

- **Control mediante *joystick* o mediante realidad virtual**

En el CAR ya se han desarrollado varios proyectos que se han llevado a realidad virtual con éxito. Por tanto, una posible línea futura de investigación sería desarrollar un entorno virtual en el que poder interactuar con el robot o bien, realizar un control del movimiento del robot mediante un *joystick*.

Asimismo, dentro de este nuevo desarrollo en realidad virtual, resultaría muy interesante implementar la detección de objetos u obstáculos y la operación con ellos.

8. CONCLUSIONES



8. CONCLUSIONES

Al comienzo de este trabajo se ha realizado un estudio sobre los diferentes tipos y clasificaciones de los robots, así como de su estado del arte. Dicho estudio ha sido gran ayuda a la hora de la elección del prototipo que se iba a diseñar.

Finalmente, se ha decidido realizar un robot híper-redundante, continuo y blando con 16 GdL y construido mediante TPCJ, adecuado para emplearse en áreas de inspección y medicina al que se ha llamado *Pylori-I*. Por tanto, se desea que el *Pylori-I* pueda llevar a cabo recolecciones de muestras, tareas de inspección visual y manipulación de objetos de pequeño calibre. Su posible miniaturización también es contemplada de cara a poder introducirse en zonas de difícil acceso o realizar inspecciones médicas más profundas. A partir de dichas características, se han hecho las modificaciones necesarias en el diseño original del prototipo.

En el diseño final, la estructura del robot está compuesta por 52 discos pivotantes distribuidos en cuatro secciones de la forma 20-12-12-8 partiendo desde la base. El disco posicionado en el extremo de cada sección tiene que ser diferente de los demás para poder fijar los cables en ellos.

La actuación se realiza mediante cables y motores PaP. La disposición de los cables escogida es de cuatro actuadores por sección que se encuentran diametralmente opuestos dos a dos. En su construcción es muy importante tener en cuenta el desfase que hay entre cada sección para un correcto guiado de los cables.

Está compuesto casi en su totalidad por componentes impresos en 3D, a excepción de los cables, los motores y la malla protectora. Su longitud final es de 260 mm, 463 mm si se tienen en cuenta el distribuidor de cables y el banco de motores.

Dado que se trata de un robot continuo y blando, podrá ser empleado como robot colaborativo en cualquier entorno, incluida la naturaleza, ya que su movimiento continuo semejante al de una serpiente o una trompa de elefante evita grandes impactos ambientales.

En cuanto al control cinemático, se ha realizado una comparación entre las cinemáticas ya existentes para este tipo de robot, llegando a la conclusión de que, aquellas que se han implementado utilizando el cálculo de la Jacobiana, no funcionan correctamente una vez se añaden las restricciones de giro de los discos. Por lo tanto, la cinemática utilizada en el proyecto ha sido aquella calculada mediante el Descenso del Gradiente.

Como hardware de control se ha empleado un armario electrónico proporcionado por el CAR y que se compone, principalmente, de un *Arduino Due* y 18 drivers *TB6600*. Este armario controla motores de tipo PaP mediante Arduino recibiendo como dato de Matlab los pulsos que han de girar los motores.

Llegados al punto de los experimentos y sus resultados, la principal conclusión es que se observan diferencias entre el comportamiento del robot físico y los obtenidos de manera teórica. Esto puede ser debido a que se ha considerado un comportamiento ideal para el robot en el que la flexión de la sección se distribuye uniformemente a lo largo de todos los discos que la conforman, a la fricción entre cables y discos, o a una mala calibración inicial.

Cabe destacar que el comportamiento del robot no es del todo erróneo ya que se orienta y aproxima hacia el punto deseado, solo que con un error muy superior al indicado en simulación.

Por tanto, como resultado de este primer prototipo realizado en el CAR que emplea TPCJ como método constructivo, hay que resaltar que el *Pylori-I* posee todas las características buscadas para tener una gran flexibilidad y maniobrabilidad ante obstáculos.

9. ENLACES EXTERNOS



9. ENLACES EXTERNOS

Debido a la gran cantidad de programas, datos, información, imágenes y videos utilizados y generados a lo largo del proyecto, se ha creado un repositorio y una lista de reproducción de acceso público que poder visitar en caso de cualquier duda o de querer tener más información referida a este trabajo.

El repositorio se puede encontrar en el siguiente enlace:

<https://github.com/LnaMzSz/Pylori-I>

La lista de reproducción con los videos realizados se puede encontrar en YouTube mediante el siguiente enlace:

https://youtube.com/playlist?list=PL3Q5Xz4yvA3jVhCCdIYIbSSO-qLm97V_n

10. BIBLIOGRAFÍA



10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Rodríguez Rodríguez, "MACH I. Un manipulador actuado por cables hiperredundante," Máster en Ingeniería Industrial, Departamento de Automática, Ingeniería Eléctrica y Electrónica e Informática Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2019.
- [2] P. Rao, Q. Peyron, S. Lilge, and J. Burgner-Kahrs, "How to Model Tendon-Driven Continuum Robots and Benchmark Modelling Performance," *Front Robot AI*. 2020; 7: 630245, 2020, doi: 10.3389/frobt.2020.630245.
- [3] X. Dong, M. Raffles, S. Cobos-Guzman, D. Axinte, and J. Kell, "A Novel Continuum Robot Using Twin-Pivot Compliant Joints: Design, Modeling, and Validation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, doi: 10.1115/1.4031340.
- [4] RAE, in *Diccionario de la Lengua Española*, Edición Tricentenario ed.
- [5] G. S. Chirikjian, "Theory and Applications of Hyper-Redundant Robotic Manipulators," Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology, 1992. [Online]. Available: <https://thesis.library.caltech.edu/4458/>
- [6] A. Martín, S. Terrile, A. Barrientos, and J. d. Cerro, "Hyper-Redundant Robots: classification, state-of-the-art and issues," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 15 351–362 2018, doi: doi.org/10.4995/riai.2018.9207.
- [7] J. L. Oliver. "Grados de Libertad - Máquinas y Mecanismos - UPV." <http://www.upv.es/vltmodels/grados-de-libertad.html> (accessed 25 de Enero de 2022).
- [8] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier, and I. D. Walker, "Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research," *Applied Bionics and Biomechanics*, 5:3, 99-117, 2008, doi: 10.1080/11762320802557865.
- [9] C. Martínez Martín, "Desarrollo de un robot manipulador blando e híper-redundante," Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Centro de Automática y Robótica, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Junio 2017.
- [10] D. Márquez Alcolea, "Control y teleoperación de MACH-I, un robot manipulador híper-redundante para tareas de inspección," Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Centro de Automática y Robótica Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Febrero 2021.
- [11] J. Barrientos-Díez, X. Dong, D. Axinte, and J. Kell, "Real-Time Kinematics of Continuum Robots: Modelling and Validation," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 67 (2021) 102019, June 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2020.102019.
- [12] J. Barrientos-Díez, X. Dong, D. Axinte, and J. Kell, "Real-Time Kinematics of Continuum Robots: Modelling and Validation," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, June 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2020.102019.
- [13] MedlinePlus [Online] Available: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002360.htm>
- [14] Z. Mitros, B. Thamo, C. Bergeles, L. da Cruz, K. Dhaliwal, and M. Khadem, "Design and Modelling of a Continuum Robot for Distal Lung Sampling in Mechanically Ventilated Patients in Critical Care," *Front. Robot. AI*, 2021, doi: 10.3389/frobt.2021.611866.
- [15] J. Granna, A. Nabavi, and J. Burgner-Kahrs, "Computer-assisted planning for a concentric tube robotic system in neurosurgery," *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2019 Feb;14(2):335-344, 2018, doi: 10.1007/s11548-018-1890-8.

- [16] D. T. Friedrich, V. Modes, T. K. Hoffmann, J. Greve, P. J. Schuler, and J. Burgner-Kahrs, "Teleoperated tubular continuum robots for transoral surgery – feasibility in a porcine larynx model," *Int J Med Robot* . 2018 Oct;14(5):e1928, 2018, doi: 10.1002/rcs.1928.
- [17] J. Bravo Algaba, "Optimización del diseño de un robot hiper-redundante de cables mediante algoritmo genético," Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Centro de Automática y Robótica, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Septiembre 2021.
- [18] "¿Cuánto gana un Ingeniero Industrial en España?" <https://es.talent.com/salary?job=ingeniero+industrial#:~:text=El%20salario%20ingeniero%20industrial%20promedio,hasta%20%E2%82%AC%2041.640%20al%20a%C3%B1o> (accessed 05 de Febrero de 2022).
- [19] "¿Cuánto cobra un profesor de universidad?" <https://www.jobted.es/salario/profesor-universidad> (accessed 05 de Febrero de 2022).

ANEXO I



ANEXO I: GLOSARIO Y ABREVIATURAS

- **Baudrate:** Número de baudios por segundo transmitidos en la comunicación.
- **CAR:** Centro de Automática y Robótica
- **COM:** Puerto serie utilizado para conectar dispositivos periféricos a un ordenador mediante comunicación bit a bit.
- **ECTS:** European Credit Transfer and Accumulation System. Sistema europeo adoptado por las universidades del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES).
- **GdL:** Grado de libertad. cada uno de los movimientos independientes que una articulación puede realizar respecto a la articulación anterior.
- **Home:** Posición de reposo del robot.
- **IHM:** Interfaz Hombre Máquina.
- **Motores PaP:** motor paso a paso. Conocido también como *stepper*, motor que capaz de girar una cantidad de grados (paso o medio paso) dependiendo de sus entradas de control.
- **Robot continuo:** robot en el que el movimiento se produce a lo largo de toda la longitud.
- **Robot híper-redundante:** robot que, siendo redundante, tiene un elevado número de GdL.
- **Robot redundante:** robot que dispone de un mayor número de grados de libertad de los mínimos necesarios para alcanzar todos los puntos de su espacio de trabajo.
- **TCP:** Tool Center Point. Punto central del final de un brazo robótico donde se situaría la herramienta.
- **TPCJ:** Twin-pivot compliant joint. modo de construcción de un robot híper-redundante alternativo al empleo de juntas rígidas o *backbone*.

ANEXO II



ANEXO II: IMPACTO SOCIAL, AMBIENTAL Y ECONÓMICO

Tal como ya se ha destacado anteriormente en este documento, en la sociedad, los robots híper-redundantes están siendo de gran utilidad en los campos de la aeronáutica, la automatización, la medicina, etc., ya que suponen un gran avance e innovación para estos sectores. Por otro lado, tienen un menor impacto en el medio ambiente debido a los materiales empleados en su construcción.

A continuación, se va a hacer un desglose más detallado de los diferentes impactos que puede llevar a cabo el desarrollo de este proyecto.

- **Impacto social:**

La aparición de este tipo de robots conlleva una nueva visión de la robótica, saliéndose de los estereotipos más comunes como pueden ser los robots de gran tamaño de las fábricas, con movimientos rígidos, y poco colaborativos.

Centrándose en el campo de la medicina, dado su semejanza con los endoscopios, se podrá observar un gran impacto en el desarrollo de cirugías poco invasivas, así como su empleo en futuras endoscopias automatizadas.

De igual manera, supondrá un gran avance en labores de inspección gracias a su gran flexibilidad, la cual le permitirá adentrarse en zonas poco accesibles o que sean peligrosas para el ser humano.

Por ejemplo, en el caso de inspección del interior de turbinas de aviones, o se desmonta la turbina (lo cual conlleva muchas horas de parada y sólo se realiza en determinados aeropuertos) o no se inspecciona (lo cual supone ciertos riesgos). Con una inspección *in situ*, sin extraer la turbina del avión, se puede inspeccionar más frecuentemente y con un menor coste.

- **Impacto ambiental:**

El impacto ambiental que este proyecto puede provocar es debido a los materiales y métodos empleados en su construcción.

Para evitar estos factores, será necesario utilizar materiales y procesos que contribuyan a la sostenibilidad.

Por otro lado, las pequeñas dimensiones del robot y su movimiento continuo y natural, no provocan un gran impacto visual en la naturaleza.

- **Impacto económico:**

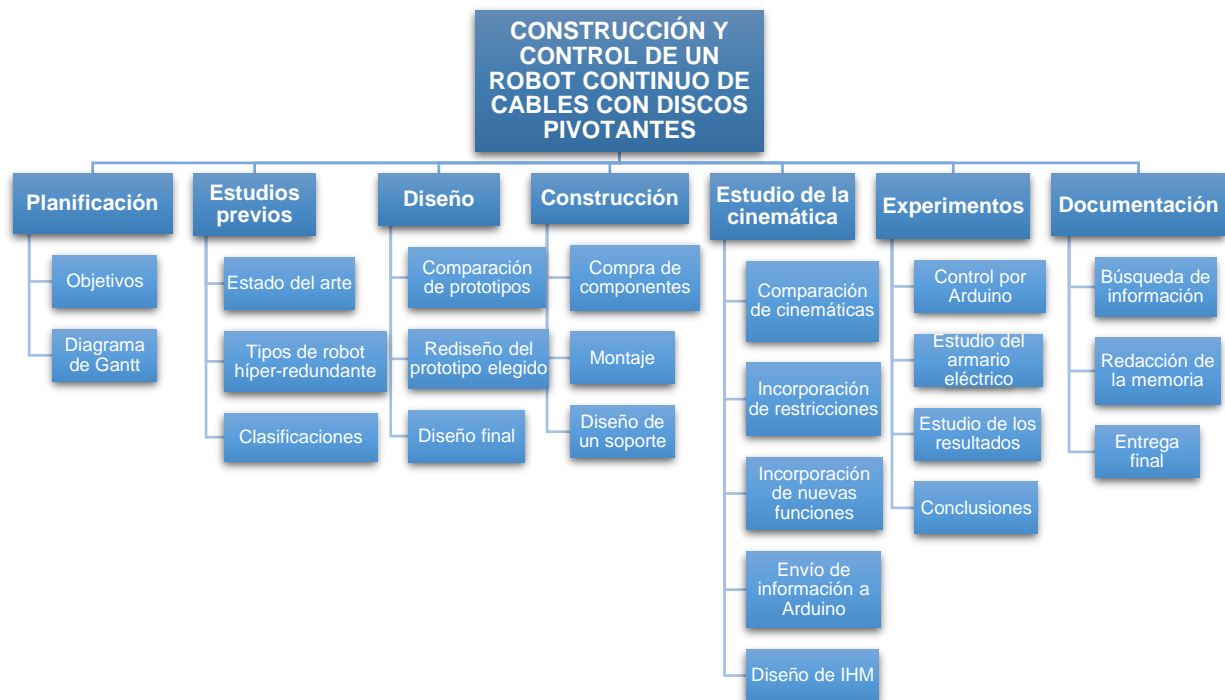
Los robots híper-redundantes no están ampliamente comercializados hoy en día, por lo que su desarrollo en un futuro próximo podría generar un gran desarrollo en la economía tanto de las empresas que lo fabriquen como de aquellas que los compren para implantarlos en su área de trabajo. Es decir, supondría un impacto muy positivo y a nivel mundial.

ANEXO III



ANEXO III: PLANIFICACIÓN TEMPORAL

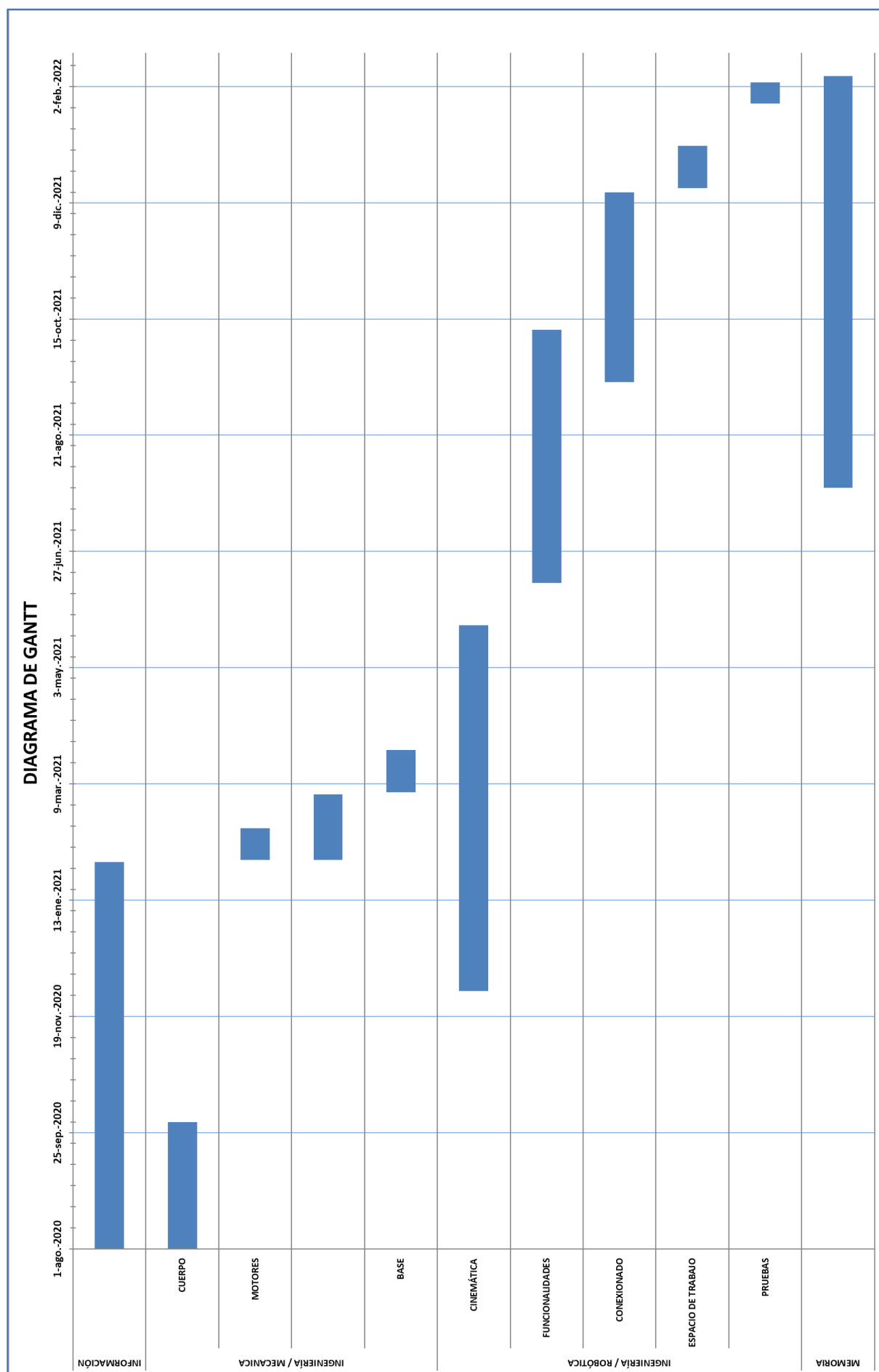
III.1. Estructura de Descomposición del Proyecto: EDP



III.2. Diagrama de Gantt

Tabla 9. Duración y distribución a lo largo del tiempo de las diferentes tareas

| | | Actividades | Fecha inicio | Duración (días) | Fecha fin |
|-----------------------|--------------------|--|--------------|-----------------|-----------|
| INFORMACIÓN | | Búsqueda de información / referencias bibliográficas | 01-ago-20 | 183 | 31-ene |
| INGENIERÍA / MECÁNICA | CUERPO | Montaje de todas las secciones pertenecientes al cuerpo | 01-ago | 60 | 30-sep |
| | MOTORES | Comprobación del funcionamiento de cada motor | 01-feb | 15 | 16-feb |
| | | Estudio de las instrucciones y el funcionamiento de la caja de motores proporcionada | 01-feb | 31 | 04-mar |
| | BASE | Montaje de las bases del robot, motores y poleas | 05-mar | 20 | 25-mar |
| INGENIERÍA / ROBÓTICA | CINEMÁTICA | Búsqueda de ecuaciones, comprobaciones y restricciones | 01-dic | 173 | 23-may |
| | FUNCIONALIDADES | Incorporación de trayectorias, colisiones, envío a Arduino | 12-jun | 120 | 10-oct |
| | CONEXIONADO | Reconstrucción del conexionado de los cables | 15-sep | 90 | 14-dic |
| | ESPACIO DE TRABAJO | Construcción de un espacio en el que realizar las mediciones | 16-dic | 20 | 05-ene |
| | PRUEBAS | | 25-ene | 10 | 04-feb |
| MEMORIA | | Redacción de la memoria | 27-jul | 195 | 07-feb-22 |



ANEXO IV



ANEXO IV: ESTUDIO ECONÓMICO

Para este proyecto se ha realizado también un estudio económico, el cual se ha dividido por un lado en costes en recursos humanos y, por otro, en costes materiales.

• Recursos Humanos

El estudio correspondiente a los recursos humanos abarca desde los costes que conlleva la dedicación del alumno según el número de horas aplicadas al trabajo, hasta los costes derivados de las horas dedicadas por el tutor.

Al Trabajo de Fin de Grado se le asignan 12 ECTS, que corresponden con una dedicación aproximada de 300 h por parte del alumno. Debido a diferentes contratiempos externos, la dedicación a supuesto más horas de las establecidas, unas 450 h.

Considerando que el salario promedio de un ingeniero industrial en España hoy en día se sitúa en 13.79 €/h, el coste final de la dedicación del alumno resulta **6205.50 €**. [18]

Con una estimación de 1900 horas laborales al año y teniendo en cuenta que el salario medio actual de un profesor titular de universidad se encuentra en torno a los 47300 € anuales, el coste de la dedicación al proyecto por parte del tutor (25 horas) asciende a **622.37 €**. [19]

• Costes materiales

| Concepto | Coste (€) |
|-----------------------------------|----------------|
| Ordenador (amortización) | 315 |
| Software de Matlab (amortización) | 50 |
| Software de diseño 3D | 0 |
| Software de Arduino | 0 |
| Calculadora científica | 30 |
| Armario eléctrico | 505.70 |
| Motores PaP | 127.52 |
| Impresión Proto Labs® | 316 |
| Impresión piezas estándar | 32 |
| Malla elástica | 8.99 |
| Hilos de pescar | 43.15 |
| Perfiles de aluminio | 87.12 |
| Carros V-Slot | 23.40 |
| Láseres | 23.98 |
| Cables | 46.60 |
| Conectores | 24.30 |
| Tornillería | 150 |
| TOTAL | 1783.76 |

• Coste final

Como resultado final del estudio, se obtiene un coste total del proyecto de **8611.63 €**.

