



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INFORMÁTICA
INGENIERIA DE LA SALUD

**DISEÑO Y CONTROL DE UN SISTEMA DE
ACOPLAMIENTO DE UN INSTRUMENTO
ENDOWRIST PARA UN BRAZO ROBÓTICO UR3**

DESIGN AND CONTROL OF A COUPLING SYSTEM OF AN ENDOWRIST
INSTRUMENT FOR AN UR3 ROBOTIC ARM

Realizado por

Carmen Alejandra Pomalía Neyra

Tutorizado por

Irene Rivas Blanco

Maria Belén Estébanez Campos

Departamento

Ingeniería de Sistemas y Automática

Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

MÁLAGA, FEBRERO DE 2020

Fecha defensa:

El secretario del Tribunal

RESUMEN

En las ultima décadas, los sistemas robóticos se han convertido en una relidad cotidiana en muchos hospitales de todo el mundo, ofreciendo numerosas ventajas que mejoran la destreza de los cirujanos mediante movimientos más precisos e intuitivos.

En este escenario, este Trabajo Fin de Grado presenta el diseño y control de un sistema de acoplamiento para un instrumento EndoWrist y un brazo robótico UR3. El EndoWrist es un instrumento robótico especializado para cirugía laparoscópica, utilizado por el robot comercial daVinci, que ofrece más grados de libertad que los instrumentos convencionales. Este instrumento comercial tiene un mecanismo de acople especialmente diseñado para el robot daVinci, por lo que no es posible utilizarlo de forma directa con otro tipo de sistema. En este proyecto se ha desarrollado un mecanismo que permite acoplar este instrumento a un brazo robótico UR3, con el que actualmente trabaja el grupo de investigación de Robótica Médica de la Universidad de Málaga.

La realización de este proyecto se divide en tres partes: una parte de diseño y montaje hardware, otra de implementación software, y una última de experimentación. En la primera parte se han empleado como dispositivos hardware 4 servomotores para controlar los grados de libertad del instrumento EndoWrist y un "Pololu Maestro Servo Controller" que gestiona el movimiento de éstos. En la parte de implementación software se ha hecho uso de Solidworks para el diseño 3D del sistema de acoplamiento y Matlab y ROS para las comunicaciones entre el brazo robótico y el Controlador Pololu. Por ultimo, el proyecto concluye con la parte de experimentación, en el que se valida la correcta implementación del sistema de acoplamiento.

Palabras claves: Cirugía laparoscópica, robótica, control, diseño.

ABSTRACT

In the last decades, robotics systems have become a daily reality in several hospitals around the world, offering numerous advantages that improve the skills of surgeons through more precise and intuitive movements.

In this scenario, this Final Degree project presents the design and control of a coupling system for an EndoWrist instrument and a UR3 robotic arm. The EndoWrist is a specialized robotic instrument for laparoscopic surgery, used by the da Vinci commercial robot, which offers more degrees of freedom than conventional instruments. This commercial instrument has a coupling mechanism specially designed for the da Vinci robot, so it is not possible to use it directly with another type of system. In this project a mechanism has been developed that allows to be attached to an UR3 robotic arm, with which the Medical Robotics research group of the University of Malaga is currently working.

The realization of this project is divided into three parts: a part of hardware design and assembly, another of software implementation and a last of experimentation. In the first part, 4 servo motors have been used as hardware devices to control the degrees of freedom of the EndoWrist instrument and a "Pololu Maestro Servo Controller" that manages their movement. In the software implementation part, SolidWorks has been used for the 3D design of the coupling system and Matlab and ROS for communications between the robotic arm and the Pololu Controller. Finally, the project concludes with the experimentation part, in which the correct implementation of the coupling system is validated.

Keywords: Laparoscopic surgery, robotic, control, design.

ÍNDICE

1	Introducción	11
1.1	Introducción a la cirugía laparoscópica	11
1.2	Motivación	12
1.3	Objetivos	13
1.4	Estructura de la memoria	15
2	Planteamiento del problema	17
2.1	Introducción	17
2.2	Robot Da Vinci	17
2.3	Herramienta EndoWrist	20
2.4	Brazo robótico UR3	23
2.5	Conclusión	24
3	Impresión 3D	25
3.1	Introducción	25
3.2	Software de diseño CAD 3D	25
3.3	Impresión aditiva	28
<u>4</u>	ARQUITECTURA HARDWARE	29
4.1	Introducción	29
4.2	Servomotores	29
4.2.1	Disco de metal 25T	30
4.3	Microcontrolador Pololu	31

4.4 Conclusión.....	34
5 Arquitectura software.....	35
5.1 Introducción.....	35
5.2 Niveles de programación.....	35
5.2.1 Alto nivel: Matlab.....	35
5.2.2 Nivel medio: ROS.....	36
5.3 Conclusiones.....	37
6 Diseño del sistema.....	38
6.1 Introducción.....	38
6.2 Desarrollo de prototipos.....	38
6.2.1 Pieza de acople articulación / servomotor.....	40
6.2.2 Pieza "carcasa".....	41
6.2.3 Pieza "Abrazadera".....	45
6.2.4 Pieza "interfaz carcasa / brazo robótico".....	48
6.2.5 Pieza "cubierta".....	50
6.3 Prototipo funcional.....	51
6.4 Comunicación software.....	55
6.5 Conclusión.....	56
7 Pruebas experimentales.....	57
7.1 Introducción.....	57
7.2 Funcionamiento de los servomotores.....	57
7.3 Nodo de ROS.....	65
7.4 Interfaz de usuario de MATLAB.....	67

8 Conclusión y futuras líneas de trabajo.....	70
8.1 Conclusión.....	70
8.2 Futuras líneas de trabajo.....	71

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción a la cirugía laparoscópica

En la actualidad, la cirugía mínimamente invasiva (CMI) se ha convertido en una técnica ampliamente aceptada como alternativa a los procedimientos tradicionales de cirugía abierta. La cirugía mínimamente invasiva, o cirugía laparoscópica, es una variante de la cirugía tradicional abierta o laparotomía tradicional, donde el cirujano realiza una sola incisión en la piel lo suficientemente grande como para que exponga una visión completa de los órganos relacionados con el procedimiento.

En la cirugía laparoscópica, el cirujano realiza pequeñas incisiones, denominadas puertos. En cada puerto, se inserta un dispositivo conocido como trocar por donde pasan instrumentos especializados, conocidos como instrumentos de caña larga, y una cámara denominada laparoscopio (Cirugía Laparoscópica, 2019). Esta técnica proporciona una serie de ventajas frente a la cirugía abierta tradicional, entre las que destacan una disminución del tiempo de estancia hospitalaria y recuperación del paciente, una reducción de complicaciones post-operatorias y un mejor resultado estético, ya que las cicatrices son menores.

En este contexto, los sistemas robóticos se han convertido en una realidad cotidiana en numerosos hospitales de todo el mundo, ofreciendo numerosas ventajas que mejoran la destreza de los cirujanos mediante movimientos más precisos e intuitivos. Estos han encontrado una amplia gama de aplicaciones, entre las que destacan los robots quirúrgicos teleoperados, controlados directamente por el cirujano, cuya

principal referencia mundial es el Sistema Quirúrgico da Vinci (Intuitive Surgical, Inc., 2007).

El sistema robótico da Vinci es un robot quirúrgico de telemanipulación que ha asistido en cientos de miles de intervenciones cada año. Este robot está compuesto por un conjunto de 4 brazos: tres de ellos para instrumental quirúrgico y el restante para la cámara laparoscópica, que responden a los movimientos que realiza el cirujano desde una consola de teleoperación remota. Desde sus inicios, el robot da Vinci ha ido mejorando sus prestaciones con nuevos diseños más compactos y nuevas herramientas con más grados de libertad. Por esto, es el robot más utilizado en el campo de la robótica quirúrgica y tiene el monopolio en el sector.

1.2 Motivación

La motivación de este Trabajo Fin de Grado se fundamenta en realizar el diseño de un sistema de acoplamiento entre un instrumento EndoWrist, en concreto un Porta Aguja (Needle Driver), que fue cedido al grupo de Investigación de Robótica Médica de la Universidad de Málaga, y un robot comercial, en concreto un brazo robótico UR3.

La línea del grupo de investigación de Robótica Médica del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga ha trabajado durante muchos años en el desarrollo de interfaces persona-máquina para cirugía laparoscópica. Este grupo trabaja con plataformas formadas por robots comerciales, como la plataforma CISOBOT, que podemos observar en la **Figura 1**, que permite teleoperar herramientas quirúrgicas convencionales, cuya apertura y cierre han sido motorizadas.

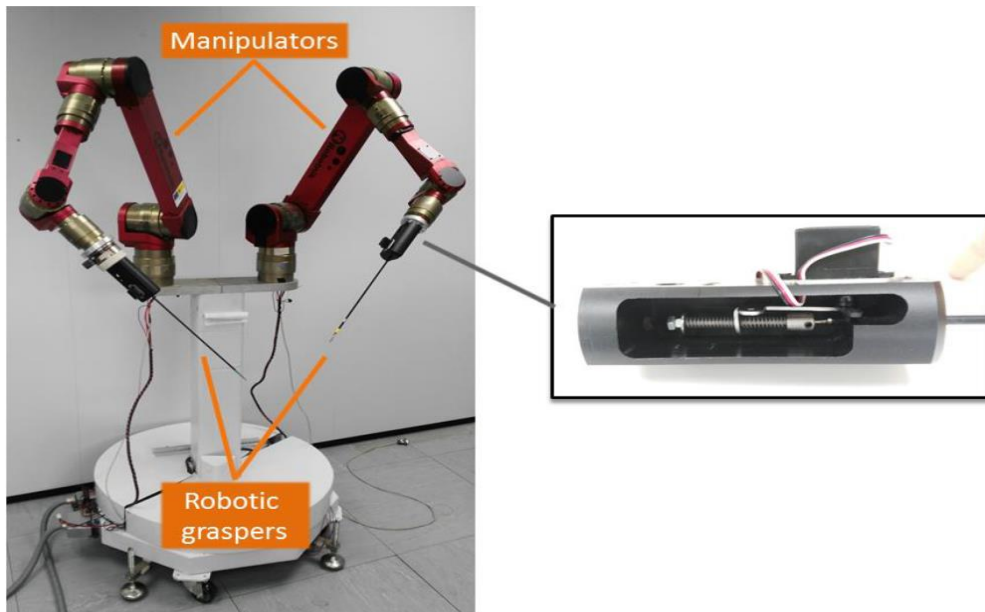


Figura 1: Plataforma CISOBOT

Por ello, el diseño del acoplamiento de la herramienta EndoWrist con el brazo robótico UR3 va a permitir introducir en sus proyectos una pinza que es capaz de realizar maniobras más complejas de las que pueden realizar con las pinzas con las que cuentan actualmente. Se ha elegido este robot porque es el que está siendo utilizado por el grupo de investigación en el montaje de la plataforma robótica con la que están trabajando en la actualidad.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto se define como el diseño e implementación de un mecanismo de acoplamiento de un instrumento EndoWrist para un brazo robotico UR3, de Universal Robots.

Este mecanismo de acoplamiento deberá incluir, tanto un mecanismo de acople al efector final del robot, como el mecanismo de actuación de los grados de libertad de la punta de la herramienta mediante un conjunto de motores, uno para

cada movimiento mecanismo que controlan los grados de libertad de la pinza.

Para ello, será necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

1. Diseño y montaje del sistema de acoplamiento

Para cumplir este objetivo se deben realizar las siguientes fases:

- Búsqueda y elección de los actuadores necesarios para actuar los mecanismos de giro que controlan los grados de libertad de la pinza.
- Fabricación del prototipo funcional del sistema de acoplamiento, para ello se hará uso de un programa de diseño 3D, SolidWorks. Posteriormente, será impreso por tecnología aditiva, impresión 3D.
- Montaje del sistema de acoplamiento diseñado, realizando tanto el montaje de los motores como el acoplamiento del sistema al efector final del brazo robótico.

2. Implementación de un software de control del instrumento

EndoWrist

Esta segunda parte abarca el control de los movimientos que realiza la herramienta EndoWrist.

En esta fase del proyecto se realizará el control de los cuatro motores acoplados al sistema diseñado en el objetivo anterior mediante un software implementado en ROS/Matlab. Para ello, se deberá hacer un ajuste experimental entre la actuación de los motores y el movimiento correspondiente de los diferentes grados de libertad del instrumento EndoWrist.

3. Validación del sistema

Se validará todo el sistema desarrollado a través de pruebas experimentales que demuestren tanto su funcionamiento de forma aislada, como su correcta integración dentro del sistema global basado en la arquitectura ROS con Matlab.

1.4 Estructura de la memoria

La memoria del presente trabajo fin de grado se encuentra dividida en ocho capítulos, cinco planos como anexos y las referencias bibliográficas. Todos los capítulos, salvo este primero y el último se inician con una introducción que expone la problemática a resolver, junto con una descripción del contenido; y terminan con unas conclusiones que destacan los aspectos más importantes del capítulo. La organización del contenido de dicho trabajo se describe a continuación:

El **capítulo 2, Planteamiento del problema**, trata sobre el instrumento quirúrgico especializado que usa el robot teledirigido daVinci, explicando sus grados de libertad y funcionamiento.

En el **capítulo 3, Impresión 3D**, se hará mención al software elegido para el diseño 3D del mecanismo de acoplamiento, objetivo de este proyecto; así como de la tecnología de impresión elegida.

El **capítulo 4, Arquitectura hardware**, trata sobre el hardware empleado para el desarrollo del trabajo, describiendo la función de cada elemento y el motivo de su elección.

El **capítulo 5, Arquitectura software**, describe el software utilizado para el diseño 3D del sistema de acoplamiento, así como las tecnologías utilizadas para la implementación del

sistema y la arquitectura ROS utilizada para la comunicación instrumento EndoWrist/Microcontrolador Pololu.

El **capítulo 6, Desarrollo y pruebas experimentales**, presenta el desarrollo de los prototipos diseñados antes de encontrar el prototipo funcional del mecanismo de acoplamiento; así como las pruebas experimentales que se han realizado para validar el funcionamiento del sistema de acoplamiento desarrollado.

El **capítulo 7, Pruebas experimentales**, desarrolla el proceso de validación del sistema realizando diferentes pruebas para ver la correcta integración tanto del hardware como del software.

Finalmente, en el **capítulo 8, Conclusiones y futuras líneas de trabajo**, se tratarán, como su nombre indica, las conclusiones que han surgido de la finalización del presente trabajo y las futuras líneas de desarrollo que pueden derivar de éste.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Introducción

En este capítulo se va a realizar una descripción sobre el sistema quirúrgico da Vinci y las partes que lo componen. Así como de las características de la herramienta EndoWrist de la que parte este proyecto, destacando los grados de libertad que proporciona y los mecanismos de giro con los que cuenta. Acabando con la descripción del robot comercial usado en este proyecto, el brazo robótico UR3.

2.2 Robot Da Vinci

Dentro del campo de la robótica quirúrgica, las plataformas teleoperadas han emergido como una solución robótica proporcionando una mayor precisión y un movimiento más intuitivo de los instrumentos quirúrgicos, y una visión tridimensional del área operativa.

El sistema quirúrgico da Vinci, que se puede observar en la **Figura 2**, es el sistema quirúrgico más sofisticado existente y más utilizado en los quirófanos del mundo. Desde el año 2000 lleva tres millones de operaciones y su intervención estrella es la extracción de próstata realizada en el Hospital Clínico de San Carlos, en Madrid (Morente, Lola M., 2017). Es un robot esclavo, que obedece al cirujano a la vez que aumenta su capacidad para operar con precisión y destreza, reduciendo el temblor y proporcionando una visión

excepcionalmente clara de la anatomía del paciente. El cirujano no opera con sus manos, opera sentado cómodamente en una consola, instalada dentro del quirófano, manipulando los mandos del robot y obteniendo una visión tridimensional del interior del paciente.



Figura 2: Sistema quirúrgico da Vinci (Intuitive Surgical Inc.)

Andalucía cuenta con 5 robots da Vinci: en el Hospital Civil de Málaga, en el Hospital Virgen del Rocío de Sevilla, como ya se ha mencionado, en el Hospital Virgen de las Nieves de Granada, en el hospital Puerta del Mar de Cádiz y la última instalación ha tenido lugar en el Hospital Universitario Reina Sofia de Córdoba. España es, junto con Alemania, Italia, Reino Unido y Francia, uno de los cinco países europeos con mayor número de robots da Vinci instalados, contando España con un total de 46 unidades (ISanidad, 2019).

Este sistema está compuesto por:

- Una **consola quirúrgica** de diseño ergonómico para el cirujano, donde el cirujano opera sentado cómodamente y con una imagen tridimensional y ampliada del interior del cuerpo. Utiliza los controles maestros para manejar todos los instrumentos.
- Un **carro quirúrgico** del paciente, que es el componente operativo del sistema da Vinci y se compone de cuatro brazos robóticos e intercambiables, montados en una única columna; tres de ellos para sostener instrumentos y el restante para la cámara. El sistema recibe las órdenes en tiempo real y reproduce los movimientos de la mano, la muñeca y los dedos del cirujano.

Un sistema de visualización de alta calidad.

- Los **instrumentos** patentados **EndoWrist (Figura 3)**, que son los propios de una operación quirúrgica, pero adaptados para fijarse al final de los brazos robóticos e ideados para permitir al profesional mantener su destreza natural. Siendo ésta una de las principales ventajas de este instrumento, ya que proporciona más grados de libertad que los instrumentos convencionales.



Figura 3: Herramientas EndoWrist

2.3 Herramienta EndoWrist

Para este proyecto, se ha partido de un instrumento EndoWrist cedido al Grupo de Investigación de Robótica Médica, en concreto un Porta Agujas (Needle Driver), **Figuras 4 y 5**.



Figura 4: Porta Agujas - Mecanismo de articulaciones



Figura 5: Porta Agujas - pinza

Los instrumentos EndoWrist proporcionan 7 grados de libertad, frente a los 5 grados de libertad de un instrumento laparoscópico estándar, siendo un rango de movimiento igual

que el que proporciona la mano (Hagen, 2014).

Los grados de libertad del instrumento EndoWrist aparecen en la **Figura 6**, son: **In out**, **Rotation**, **Wristed Yaw**, **Grasp** y **Wristed Pitch** y **Pitch** y **Yaw**. Los movimientos que corresponden con la entrada/salida del abdomen (In out), la rotación de la herramienta (Rotation), y el giro alrededor del punto de fulcro (Pitch y Yaw) más la actuación de apertura/cierre de la pinza (Grasp) son los 5 grados de libertad de un instrumento laparoscópico estándar. Los dos grados de libertad adicionales que proporcionan los instrumentos EndoWrist, que son el *Wristed Yaw* y el *Wristed Pitch*, corresponden con los giros únicamente de la punta de la herramienta.

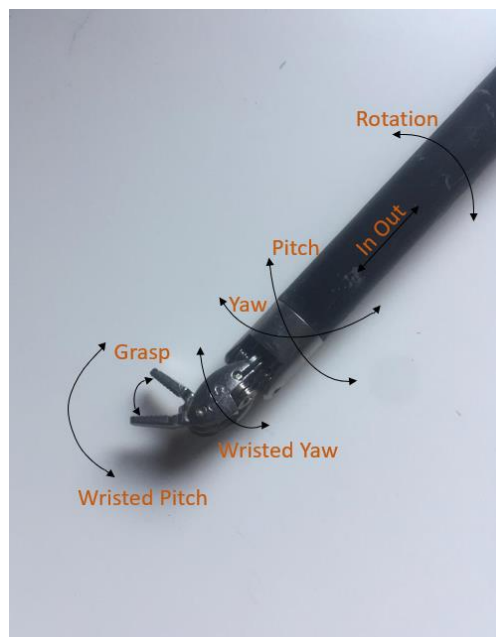


Figura 6: Rango de movimiento del Porta Agujas

Estos grados de libertad son controlados por un mecanismo que consta de una parte que va directamente acoplada con los brazos robóticos del da Vinci (**Figura 7**) y éste hace de interfaz con los mecanismos de giro de la herramienta EndoWrist (**Figura 8**).

En la figura 7 se muestra uno de los brazos robóticos del da

Vinci Research Kit (kit de investigación da Vinci), pero cuyo mecanismo es igual que el de los brazos robóticos de la plataforma comercial:



Figura 7: Mecanismo interfaz brazo robótico/Herramienta
EndoWrist

El mecanismo superior izquierdo controla el movimiento lateral de la punta de la herramienta (*Wristed Yaw*). El mecanismo superior derecho controla la rotación de la herramienta (*Rotation*). Y por último, los mecanismos inferiores, derecho e izquierdo, realizan un movimiento combinado para lograr la apertura y cierre de la pinza (*Grasp*) y (*Wristed Pitch*).



Figura 8: Mecanismos de giro de la herramienta EndoWrist

2.4 Brazo robótico UR3

El brazo robótico UR3 de Universal Robots (**Figura 9**), es el robot comercial elegido para el cual se va a diseñar el sistema de acoplamiento. Es un robot industrial colaborativo ultraligero y compacto, ideal para la aplicación sobre mesas de trabajo. Pesa tan solo 11 Kg y está dotado de 6 grados de libertad, con una rotación de más/menos 360 grados en todas sus articulaciones y una rotación infinita en el efector final (su extremo).

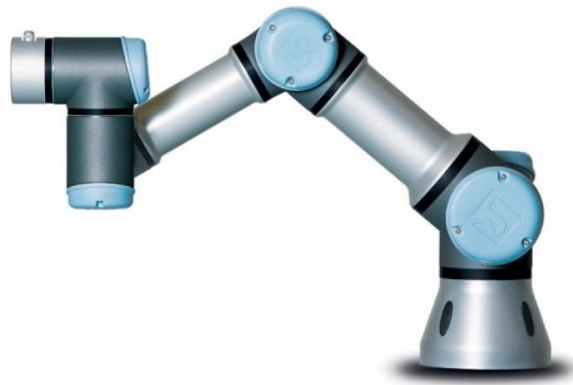


Figura 9: Brazo robotico UR3 de Universal Robots

El desarrollo de las comunicaciones con el robot y el instrumento EndoWrist ya se encuentran desarrollado en la plataforma ROS por el grupo de Robótica Quirúrgica de la Universidad de Malaga y queda fuera de los objetivos del presente proyecto.

2.5 Conclusión

En este capítulo se ha comenzado realizando una descripción sobre el sistema quirúrgico da Vinci y sobre su incremento de su uso en la cirugía laparoscópica. Concluyendo así que el sistema da Vinci es el robot quirúrgico más utilizado en todo el mundo y cuenta con unas herramientas especiales que aportan más grados de libertad que las convencionales.

Cabe destacar las limitaciones económicas que conlleva disponer de este sistema quirúrgico, ya que es una herramienta cuyo precio ronda los de 2 millones de euros (Negrete Borja, 2018). Por ello, este trabajo pretende aportar la integración de un sistema de acoplamiento de esta herramienta y un robot comercial, en este caso concreto un brazo robótico UR3, aunque podría rediseñarse para cualquier otro. Aportando así una solución a los grupos de investigación, permitiéndoles utilizar este tipo de herramientas con brazos comerciales.

3 IMPRESIÓN 3D

3.1 Introducción

En este capítulo se van a describir el software elegido para el diseño de las piezas necesarias para este proyecto, así como la tecnología utilizada para la impresión de estas piezas que forman en conjunto el mecanismo de acoplamiento del presente proyecto.

3.2 Software de diseño CAD 3D

Para el diseño del mecanismo de acoplamiento de este proyecto se ha hecho uso de un programa de diseño mecánico en 3D, SolidWorks, con el que se puede crear geometría 3D usando sólidos paramétricos, es decir, haciendo uso de parámetros y variables que definen el resultado final de un diseño.

Este software está enfocado a diseño de producto, donde se puede modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. SolidWorks diseña de forma que va dejando un historial de operaciones para que puedas hacer referencia a ellas y editarlas en cualquier momento.

En este proyecto se va a ser uso sólo del módulo de diseño mecánico con el que cuenta SolidWorks.

3.3 Impresión aditiva

La tecnología escogida para la impresión del mecanismo de acoplamiento del presente proyecto es la tecnología FDM, deposición de material fundido, por sus siglas en inglés Fused Deposition Modeling. También conocido como FFF (Fused Filament Fabrication).

Para la impresión de las pruebas de las piezas 3D necesarias para el proyecto, hasta encontrar el prototipo funcional, se ha hecho uso de la impresora BCN3D (**Figura 10**) que se encuentra en el Taller de la Escuela de Ingenierías Industriales.

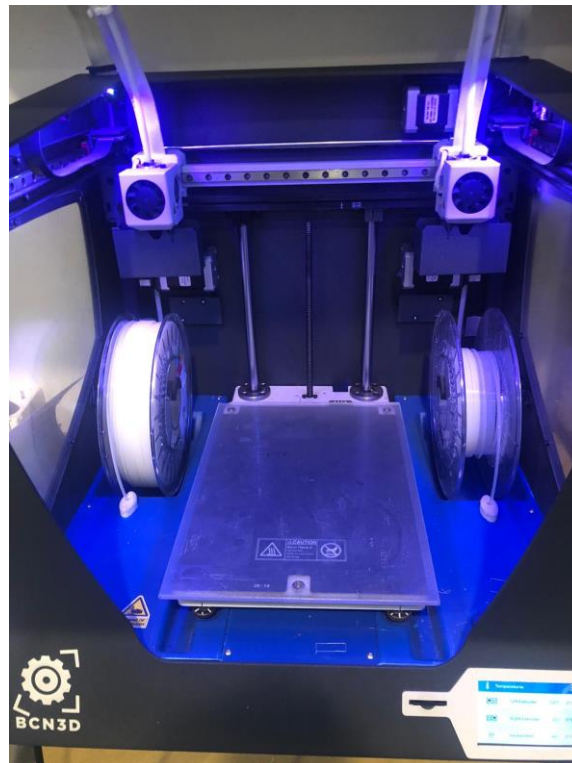


Figura 10: BCN3D Sigma

Esta impresora es una impresora 3D con doble extrusor independiente, que permite; imprimir piezas multimaterial (en modo multimaterial), imprimir un mismo modelo con ambos cabezales de manera simultánea (modo duplicación), imprimir un modelo y su parte simétrica a la vez (en modo espejo) e

imprimir con soportes solubles para crear estructuras complejas y evitar limitaciones geométricas (en modo soportes solubles).

En este proyecto se hizo uso de un solo extrusor, ya que no fue necesario el uso de ambos extrusores por la simplicidad geométrica de las piezas.

Por otro lado, para el prototipo funcional final se ha hecho uso de la impresora Ultimaker S5 (**Figura 11**) del laboratorio de Robótica Médica que se encuentra en el Parque Tecnológico. Esta impresora 3D es una de las impresoras que destaca en tecnología FDM.



Figura 11: Ultimaker S5

La ultimaker S5 dispone de doble extrusor, pero no independientes; esta característica no fue relevante a la hora de la elección de la Ultimaker S5 como medio de impresión del prototipo funcional; la gran calidad de impresión fue la característica relevante en la decisión.

3.4 Conclusión

En este capítulo se ha mencionado la tecnología usada para la impresión de nuestro mecanismo, habiendo elegido dos impresoras que destacan en la tecnología FDM, ya que esta tecnología proporciona un acabado preciso y suficiente para este proyecto.

Por otro lado, se ha mencionado el software de diseño CAD utilizado para la obtención 3D de nuestro mecanismo. Este software fue elegido por su gran capacidad de diseño y el fácil control de flujo de trabajo gracias al árbol de operaciones con el que cuenta el software.

ARQUITECTURA HARDWARE

3.5 Introducción

En este capítulo se va a mencionar las diferentes herramientas hardware que se han utilizado para el desarrollo de este proyecto, así como la mención de sus principales características y el por qué de su elección para este proyecto.

3.6 Servomotores

Para el desarrollo de este proyecto se ha hecho uso de 4 servomotores como accionamiento de los grados de libertad que dispone la pinza, uno para cada articulación, proporcionando así el movimiento controlado de cada articulación.

El servomotor elegido ha sido el 6001 HB (**Figura 12**), con unas dimensiones de 40,7 x 20,5 x 39,5 mm y unos 43 gramos de peso aproximadamente y con un rango de movimiento de 90 grados.



Figura 12: Servomotor estándar 6001 HB

La elección de este servomotor se basó en su buena relación dimensiones/peso/potencia. El peso y las dimensiones eran importantes ya que se quería que el mecanismo de acople fuese lo más ligero y reducido de tamaño posible, para así facilitar su uso. Pero tampoco se podía hacer uso de servomotores muy pequeños debido a su limitación en cuanto a potencia. La potencia es primordial ya que debe tener una potencia mínima y suficiente que le permita al motor mover cada una de las articulaciones.

3.6.1 Disco de metal 25T

Como interfaz entre las articulaciones del instrumento EndoWrist y los servomotores 6001HB se ha hecho uso de 4 discos de metal de 25T (**Figura 13**); disco que encaja con el engranaje del motor y que se sujeta a las articulaciones mediante 4 tornillos.



Figura 13: Disco de metal 25T

El uso de un disco de metal en lugar de un accesorio que suele venir con el motor, de plástico, se realiza debido a la buena sujeción que proporciona este disco y por el reducido espacio que se quiere que ocupe en el diseño del mecanismo, requisito primordial para el proyecto.

3.7 Microcontrolador Pololu

Para esto proyecto, se ha hecho uso de un Micro Maestro (**Figuras 14 y 15**) de 6 canales. Es el servocontrolador USB de segunda generación más pequeño de Pololu. Se eligió este y no uno con mayor número de canales (Mini Maestros) porque Micro Maestro es un servocontrolador altamente versátil y una placa de E/S de uso general en un paquete altamente compacto.



Figura 14: Microcontrolador de Pololu

Este microcontrolador tiene un modo de control USB, para conexión directa al PC y es el método de control que se utiliza en este proyecto. Es un dispositivo que permite el control de servos con entradas y salidas analógico-digitales y tiene una gran precisión y alta resolución de pulsos en un margen de menos de 200 ns; haciéndolo que sea una herramienta adecuada para un alto rendimiento mecánico y electrónico con un control exacto de aceleración y velocidad.

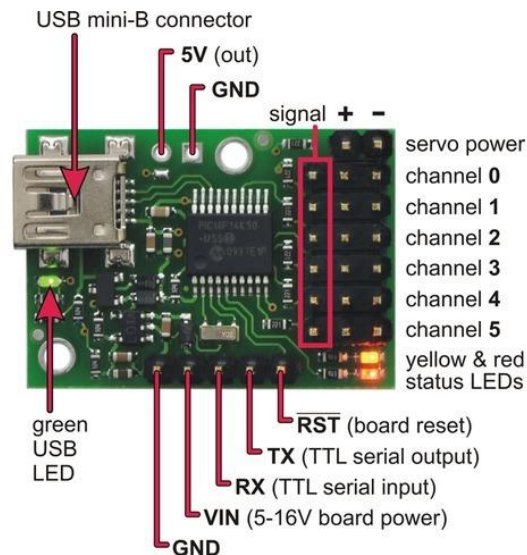


Figura 15: Microcontrolador de Pololu - Características

El microcontrolador Pololu Micro Maestro 6-canales se conecta a un PC vía puerto USB con un cable USB A a mini-B. Esta conexión USB se usa para configurar el controlador El "Maestro Control Center" es la herramienta gráfica que

facilita el uso de la interfaz USB y la cual se ha usado para configurar y probar el microcontrolador. También permite enviar comandos al controlador y recoger información del estado del mismo.

Luego, la alimentación del procesador se puede tomar desde la conexión USB o externamente con una fuente de alimentación de entre 5 a 16V, conectados a "servo power".

En este proyecto se ha contado con una fuente de alimentación de 9V (**Figura 16**); se eligió así porque si la fuente de alimentación externa cae por debajo de 5V, no está garantizado el correcto funcionamiento incluso estando conectado desde el USB.



Figura 16: Fuente de alimentación de 9V

Por último, se han utilizado 4 canales de la placa, uno para cada servo (**Figura 17**):

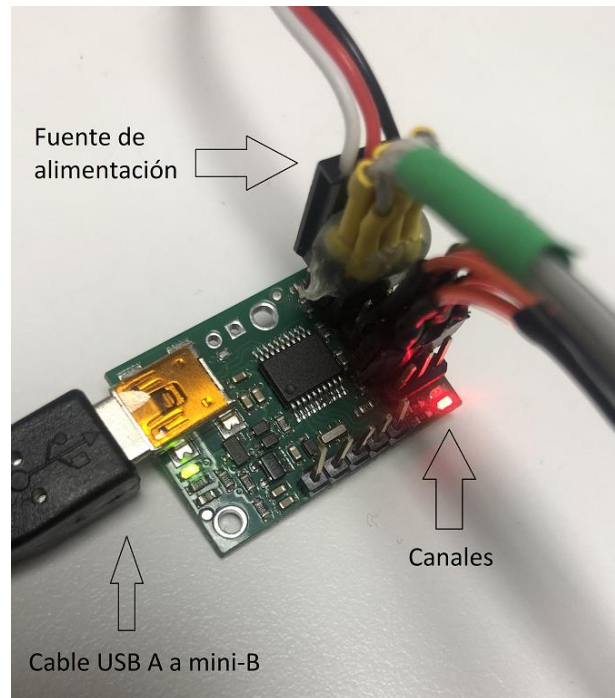


Figura 17: Microcontrolador Pololu y sus conexiones

3.8 Conclusión

A lo largo del capítulo se ha descrito tanto los servomotores utilizados para el control de los grados de libertad del instrumento EndoWrist, así como el microcontrolador que se ha elegido para el control de éstos. La elección de estos dispositivos se ciñe a las necesidades de este proyecto, pudiendo variar en el futuro.

5 ARQUITECTURA SOFTWARE

5.1 Introducción

En este capítulo se va a hacer mención a las diferentes herramientas software que se ha usado para realizar la comunicación del Instrumento EndoWrist / Microcontrolador Pololu.

5.2 Niveles de programación

La arquitectura software consta de tres niveles de programación. En el alto nivel se encuentra Matlab, plataforma sobre la que se modela los movimientos de los servomotores a través de una interfaz creada para ello.

En un nivel intermedio se encuentra el sistema ROS, con el cual se establecen las comunicaciones entre el alto nivel y los dispositivos hardware.

Por último, en el bajonivel aparece el "Pololu Maestro Servo Controller", encargado de gestionar el envío y recepción de los movimientos de los servomotores.

5.2.1 Alto nivel: Matlab

Su nombre viene de la abreviación MATrix LABoratory, es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación

propio, que está basado en matrices.

En este trabajo, en concreto, se ha empleado la Robotics toolbox, que proporciona una interfaz que conecta MATLAB y Simulink con el Sistema Operativo Robótico (ROS), lo que permite crear una red de nodos ROS.

El mecanismo para que los nodos de ROS intercambien datos es enviar y recibir mensajes. Los mensajes se transmiten en un topic y cada topic tiene un nombre único en la red de ROS. Si un nodo desea compartir información, usará un topic y la función `rospublisher`, publicando así esa información esperando que alguien la lea; y un nodo que desee recibir esa información usará ese mismo topic, suscribiéndose a él para poder acceder a esa información(`rossubscriber`).

Por otro lado, se ha hecho uso de GUIDE, entorno de programación visual disponible en MATLAB para realizar y ejecturar programas que necesiten un ingreso continuo de datos.

5.2.2 Nivel medio: ROS

El sistema operativo robótico, ROS, consiste en un "meta-sistema operativo" de código abierto que proporciona un conjunto de librerías y herramientas para robots, lo que permite a desarrolladores software crear aplicaciones robóticas con mayor facilidad, así como integrar diferentes plataformas robóticas dentro de una red que permite la comunicación entre ellas. El lenguaje elegido para la programación de los nodos de ROS ha sido C++.

Para comprender el funcionamiento básico de ROS, hay que destacar los principales elementos que lo componen:

- **Nodos:** equivale a un proceso del sistema operativo.

Consiste en un programa independiente en ejecución y memoria, creado por ROS con propiedades que le permiten comunicarse con otros nodos. Son los encargados de publicar o suscribirse a uno o varios topics.

- **Topics:** Son intermediarios en la comunicación entre nodos, ya que actúan como sistema de transporte a través del cual se intercambian mensajes. Cuando un nodo envía información se dice que está publicando un mensaje, y cualquier otro nodos de ROS puede suscribirse a él.
- **Mensajes:** Estructura de datos que se envía entre nodos a través de los topics.
- **Roscore:** Es la primera instrucción que debe ejecutarse para comenzar a usar ROS. Este es un nodo raíz que es el encargado de tramitar la comunicación con el resto de nodos.

5.3 Conclusiones

A lo largo del capítulo se ha detallado en primer lugar la arquitectura de control (niveles de programación) para el control de movimiento de las articulaciones de la herramienta endoWrist, contando el uso de MATLAB y los nodos de ROS para dicha comunicación. De esta manera, se alcanzará el control deseado y dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo la posterior adición de nuevos elementos al mismo.

6 DISEÑO DEL SISTEMA

6.1 Introducción

En este capítulo se va a tratar el desarrollo que ha seguido este proyecto hasta encontrar el prototipo funcional del mecanismo de acoplamiento, objetivo de este proyecto. Así como la interfaz de usuario que se ha creado para el manejo de la pinza quirúrgica una vez que está acoplada en el robot.

6.2 Desarrollo de prototipos

Los componentes implicados en el desarrollo de los prototipos del mecanismo de acople hasta llegar al prototipo funcional han sido diseñados en SolidWorks para poder así obtener un prototipo óptimo y eficaz al imprimirlo en 3D.

Por lo tanto, se diseñó el servo 6001HB (**Figura 18**):

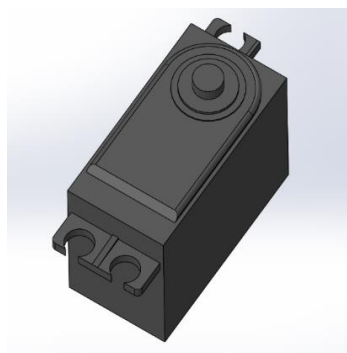


Figura 18: Servomotor 6001HB diseñado en SolidWorks

De igual manera, se diseñó el disco de metal 25T (**Figura 19**):

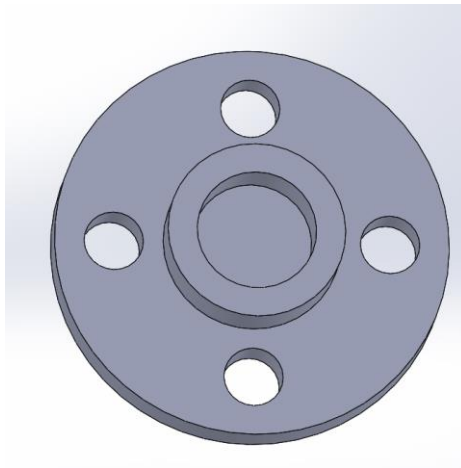


Figura 19: Disco de metal 25T diseñado en SolidWorks

Y por último, se diseñó al detalle el instrumento EndoWrist en SolidWorks (**Figura 20 y 21**):

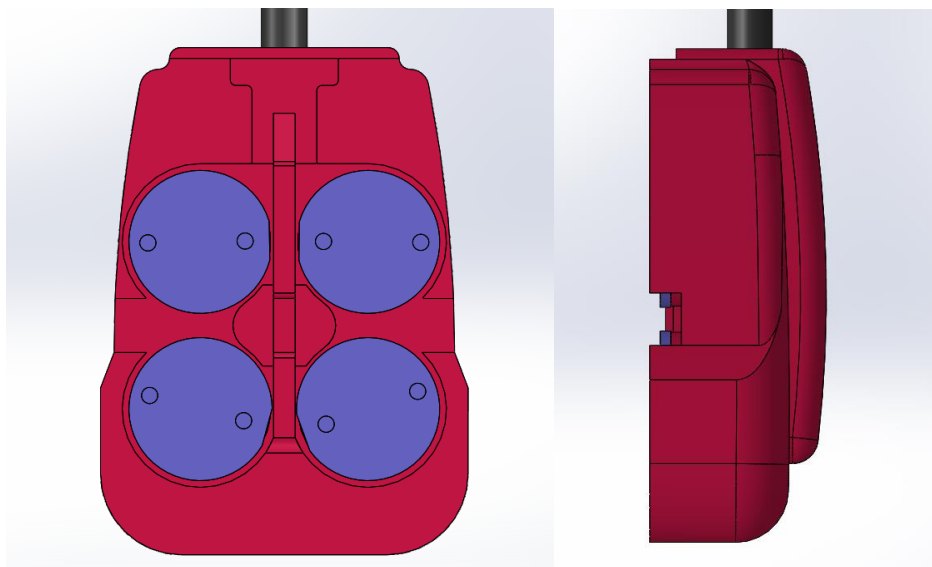


Figura 20: Diseño de articuladores de la herramienta EndoWrist

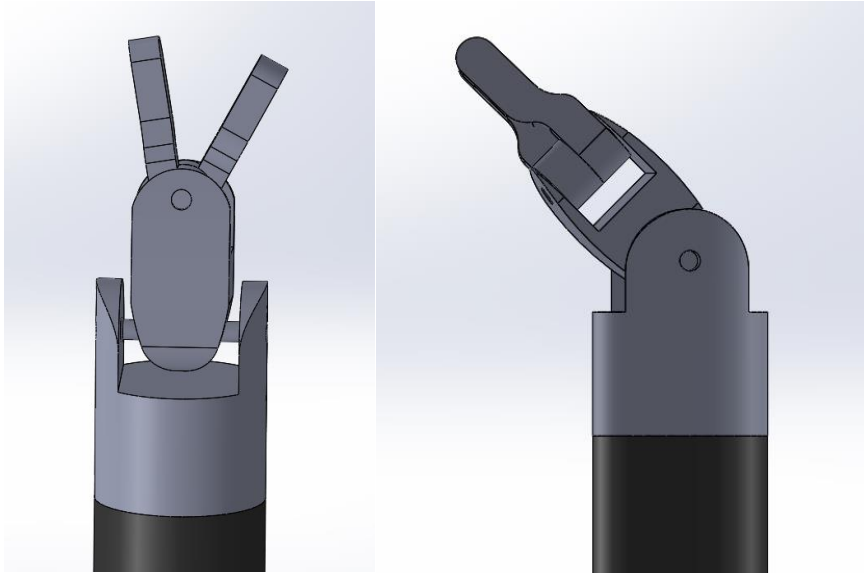


Figura 21: Diseño de la pinza en SolidWorks

El primer prototipo del mecanismo de acoplamiento se desarrolló como un conjunto de 4 piezas, que posteriormente pasaron a 5. Las 4 piezas son las denominadas **"Acople articulación/motor"**, **"carcasa"**, **"abrazadera"** e **"interfaz carcasa / brazo robótico"**. Y la pieza, que en prototipos finales se añadió fue una **"cubierta"** a la carcasa, para que no se viesen los motores desde fuera.

Para el diseño de estas piezas se hizo uso del entorno ensamblaje de SolidWorks, el cual permite introducir diferentes elementos en un mismo archivo y establecer relaciones de posición entre ellos y exportar luego los sólidos que quieras en una posición determinada para posteriormente diseñar las piezas necesarias.

6.2.1 Pieza de acople articulación / servomotor

La primera pieza diseñada fue la denominada **"Acople articulación/servomotor"**, que es una pieza que sirve de interfaz y acople entre la articulación de la pinza y el disco de metal 25T, que este irá a su vez unido al motor.

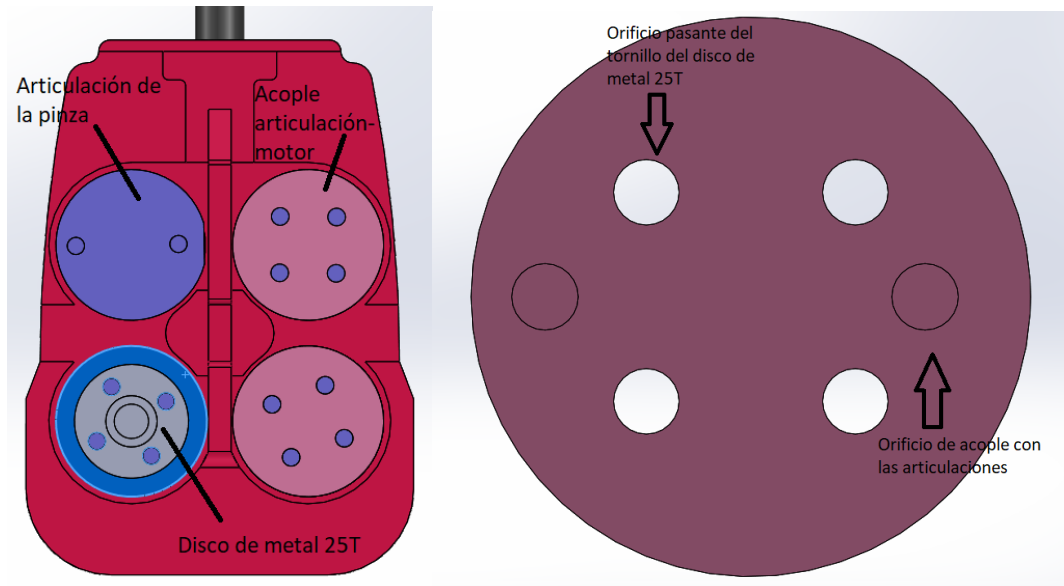


Figura 22: Pieza 3D "Acople articulación/motor" diseñado en SolidWorks

6.2.2 Pieza "carcasa"

Luego, en el mismo ensamblaje, se añadieron los 4 motores, cuya ubicación vino determinada por la concentricidad de sus ejes con los ejes de los discos de metal 25T (**Figura 23**). Cuando todos estos componentes se ubicaron en su posición correcta, se diseñó la pieza denominada como "**carcasa**", la cual servirá de almacenamiento y soporte de los cuatro servomotores.

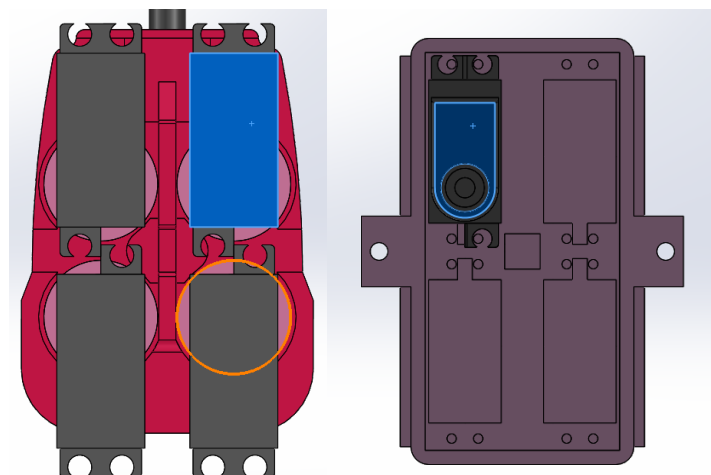


Figura 23: Primer prototipo de la pieza carcasa en

SolidWorks

Este **primer prototipo** fue diseñado haciendo el booleano de los 4 servomotores, creando taladros por donde pasarán pequeños tornillos, a cada lateral (lateral más corto) de cada servomotor, fijando así cada uno de los servomotores. El diseño cuenta también con dos "aletas" laterales que servirían para unir la pieza "abrazadera", explicada más adelante, con nuestra pieza carcasa.

Por otro lado, la pieza "carcasa" cuenta también con 2 railes laterales que servirán de acople con la pieza "interfaz carcasa / brazo robótico", que se explicará más adelante.

Este primer prototipo tuvo varios inconvenientes que no se consideraron en el primer diseño, ya que al no diseñarse el cable del servomotor en SolidWorks, no se consideró el espacio que ocupaba éste y la dificultad para su montaje en la carcasa. Este problema fue detectado al realizar su impresión en 3D e intentar incorporar los elementos en los alojamientos diseñados. En la imagen de la izquierda de la **Figura 24** se aprecia que no hay espacio suficiente para el cable del motor y el montaje con esta propuesta de carcasa no es fácil.

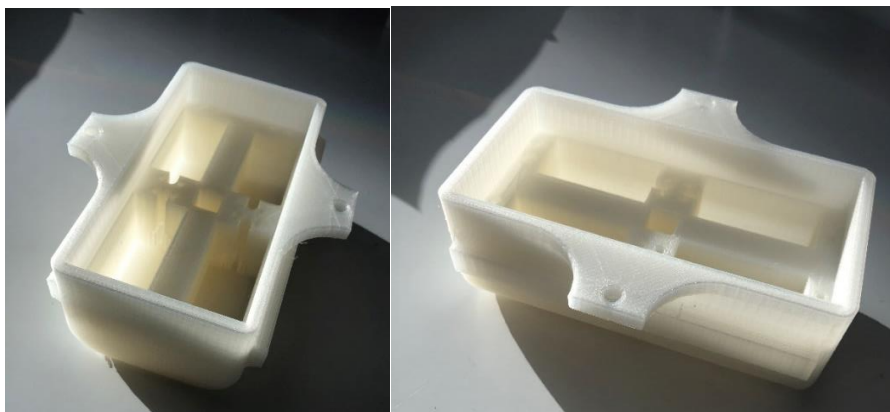


Figura 24: Primer prototipo de la pieza "carcasa" impresa en 3D

Por ello, este prototipo fue evolucionando (**Figura 25**) y el primer cambio fue quitar las paredes que separaban un

servomotor de otro, para así crear un mayor espacio entre ellos para introducir cada uno fácilmente.

Otro cambio fue que se le añadió un pequeño pivote en uno de los lados (lado más estrecho) de la carcasa, entre 2 de los 4 servomotores; este pivote serviría como un acople adicional con la pieza "abrazadera", teniendo ahora 3 orificios por donde pasarían 3 tornillos, en lugar de 2, como pasaba en el primer prototipo. Además, a este prototipo se le realizó un orificio lateral que sirve de conducto para los cables, ya que estos deben situarse fuera de la carcasa para así tener los cables ordenados y juntos.

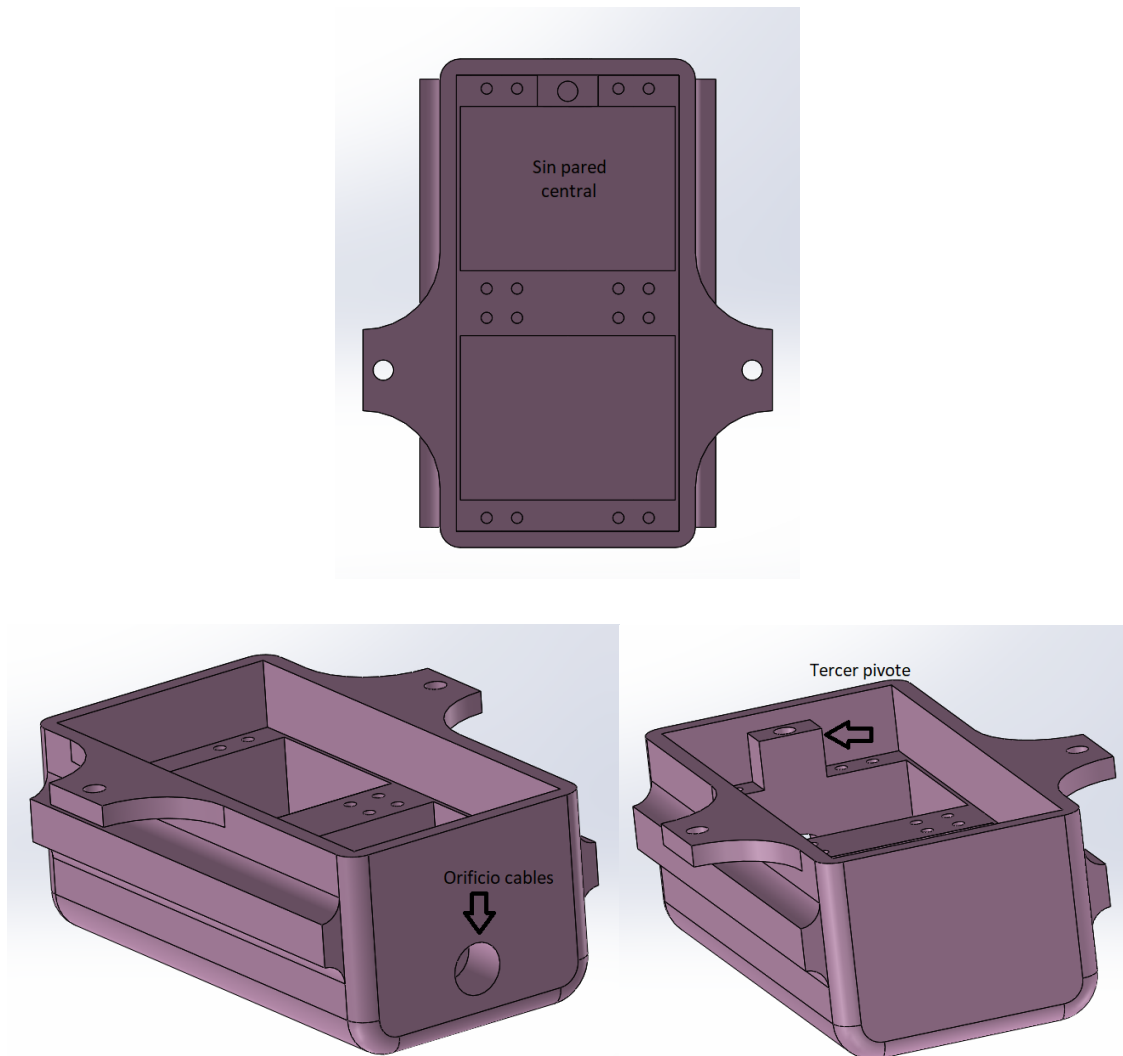


Figura 25: Segundo prototipo de la pieza "carcasa" en SolidWorks

Este prototipo, al igual que el anterior, se imprimió (**Figura 26**) con la impresora 3D BCN3D Sigma:

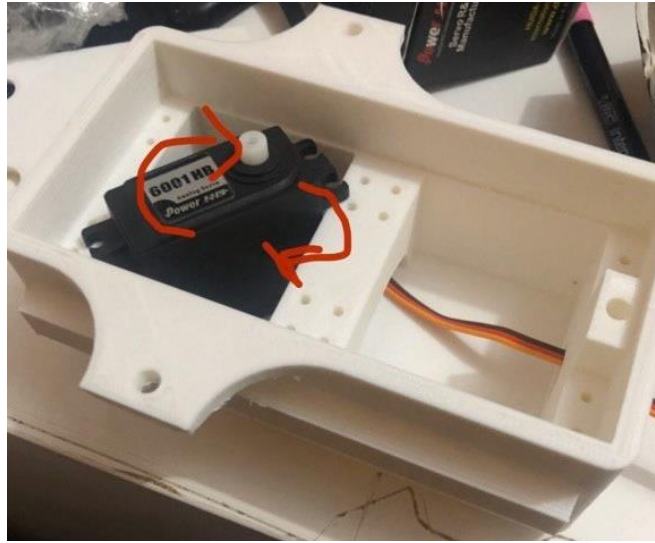


Figura 26: Segundo prototipo de la pieza "carcasa" impresa en 3D

Este **segundo prototipo**, tal y como se ve en la **figura 26** permitía la inserción del motor pero no permitió el giro necesario para colocarlo en la posición que debía de estar.

Por lo tanto, llegamos así al prototipo final de esta pieza, que se obtuvo eliminando un trozo de la pared que aún había entre los servomotores (creando un pasadizo entre ellos). Por otro lado, se creó una nueva aleta, lateralmente a la carcasa, sustituyendo el pivote del prototipo 2, para así acoplar con un tornillo la pieza "abazadera" con la carcasa sin dificultad. Se obtuvo así un diseño funcional de esta pieza (**Figura 27**).

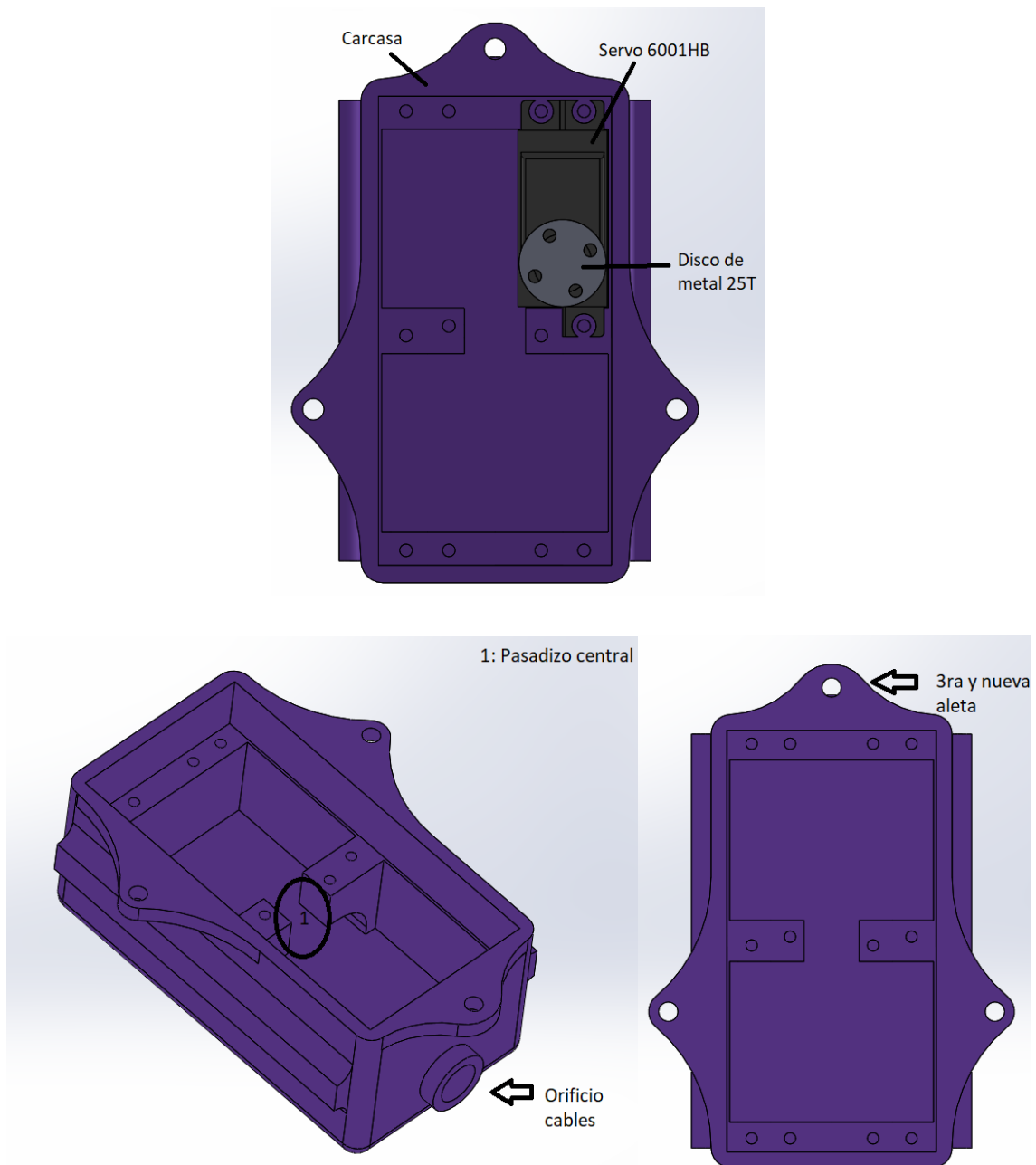


Figura 27: Prototipo final de la pieza "carcasa" en SolidWorks

6.2.3 Pieza "Abrazadera"

La siguiente pieza diseñada es la denominada "**abrazadera**", la cual se creó a partir del diseño de la herramienta en SolidWorks, encajando esta pieza perfectamente a la superficie del instrumento EndoWrist (**Figura 28**).

La abrazadera se acopla a la carcasa a partir de tornillos, asegurando la sujeción de la herramienta quirúrgica durante su funcionamiento.

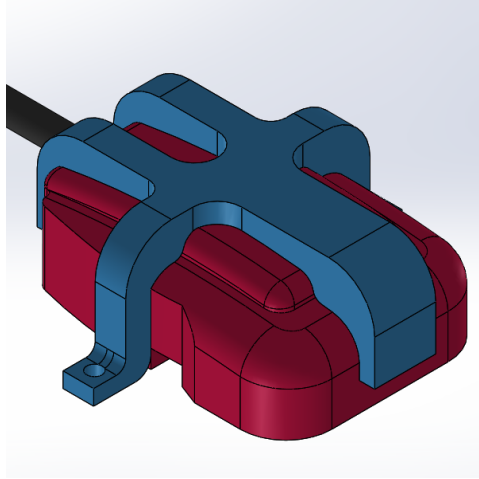


Figura 28: Primer prototipo de la pieza “abrazadera” en SolidWorks

Este prototipo también se imprimió con la impresora BCN3D Sigma en material ABS (**Figura 29**):



Figura 29: Primer prototipo pieza “abazadera” impresa 3D

Vimos nuevas posibilidades en el diseño de esta pieza y para asegurar que no se produjese el fallo de la misma durante una maniobra o evitar los movimientos no deseados entre los elementos a unir, se consideró poner 3 orificios por donde pasasen 3 tornillos, en vez de 2, como se diseñó en el primer prototipo.

Por lo tanto, se añadió una nueva aleta (**Figura 30**) que encajaría con el pivote creado en el segundo prototipo de la carcasa.

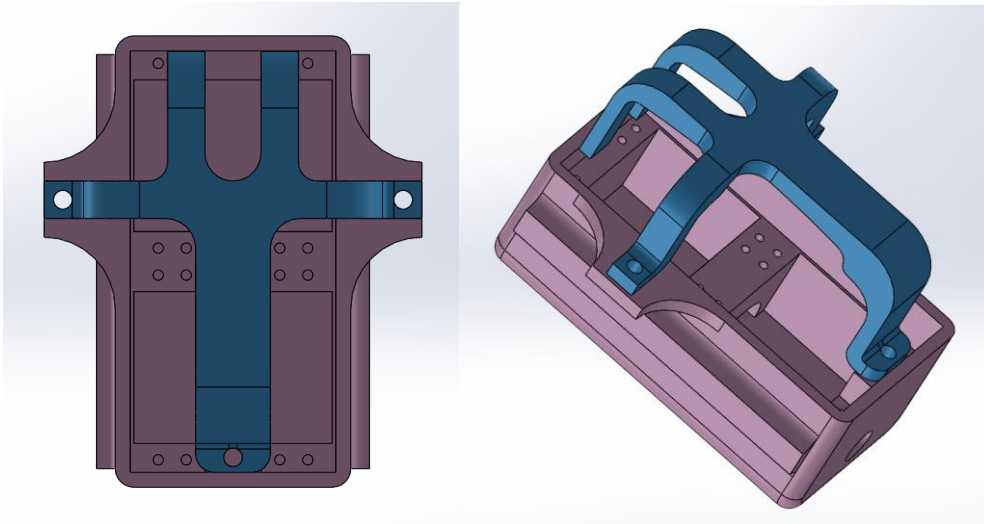


Figura 30: Segundo prototipo de la pieza "abrazadera" en SolidWorks

Este segundo prototipo no obtuvo buenos resultados ya que la unión del pivote de la carcasa y la nueva pequeña aleta lateral de la abrazadera realizaba una unión poco eficiente y difícil de encajar, debido a los errores de impresión y el poco espacio del que disponía esta aleta.

Por lo tanto, llegamos así al prototipo final de esta pieza, cambiando la posición de esta aleta, llevándola más para afuera y que encajase con la nueva aleta del prototipo 3 de la carcasa, consiguiendo así un acople más adecuado (**Figura 31**).

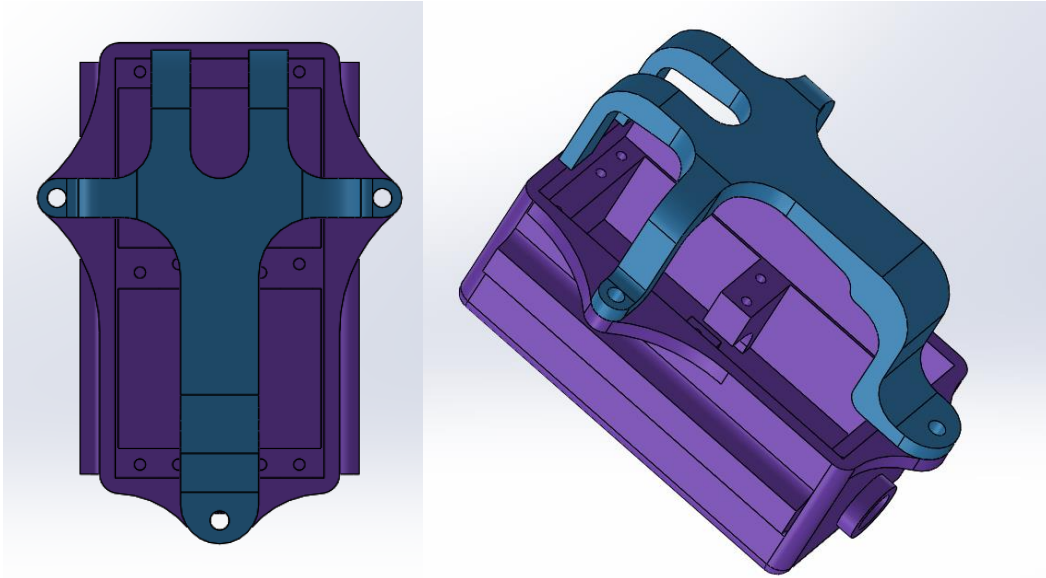


Figura 31: Prototipo final de la pieza "abrazadera" en SolidWorks

6.2.4 Pieza "interfaz carcasa / brazo robótico"

La última pieza en la que se pensó inicialmente fue una pieza que sirviese de interfaz entre la carcasa ya diseñada y el efector final del brazo robótico UR3. Esta pieza se denominó **"interfaz carcasa / brazo robótico"**.

Esta pieza no tuvo más de un prototipo (**Figura 31**) y se abordó el diseño cuando la propuesta para la carcasa era definitiva. Esta pieza interfaz debe encajar perfectamente con la superficie de la carcasa y la solución adoptada para esto es gracias a dos raíles laterales en ambos elementos, siendo raíles macho en la carcasa y raíles hembra en la interfaz.

Además, esta pieza tiene hecho unos taladros en la base, que son los orificios que se necesita para introducir 2 tornillos avellanados que acoplan esta interfaz con el efector final del brazo robótico UR3.

Aunque como se ha mencionado, no hubo prototipos, se imprimió dos veces, ya que en la primera impresión no se tuvo en cuenta, por que no se diseñó en SolidWorks, los tornillos laterales que tenía el mecanismo carcasa-abarazadera (ver la imagen izquierda de la **Figura 31**). Por lo tanto, los tornillos de las aletas de la carcasa laterales hacían interferencia con esta pieza.

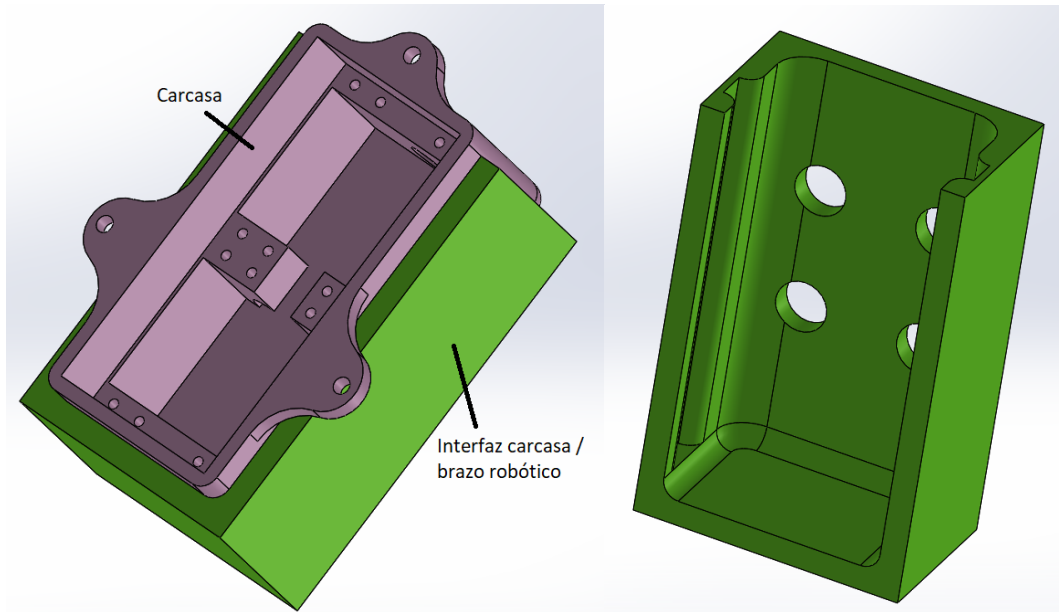


Figura 31: Primer diseño de la pieza "Interfaz carcasa / brazo robótico" en SolidWorks

Debido a los problemas presentados en la primera versión, a este primer diseño se le ha realizado un rail exterior lateral para que pasen sin interferencias los tornillos y se le han redondeado los bordes y esquinas para obtener un mejor acabado. De esta forma, la apariencia definitiva de la pieza se puede observar en la **Figura 32**.

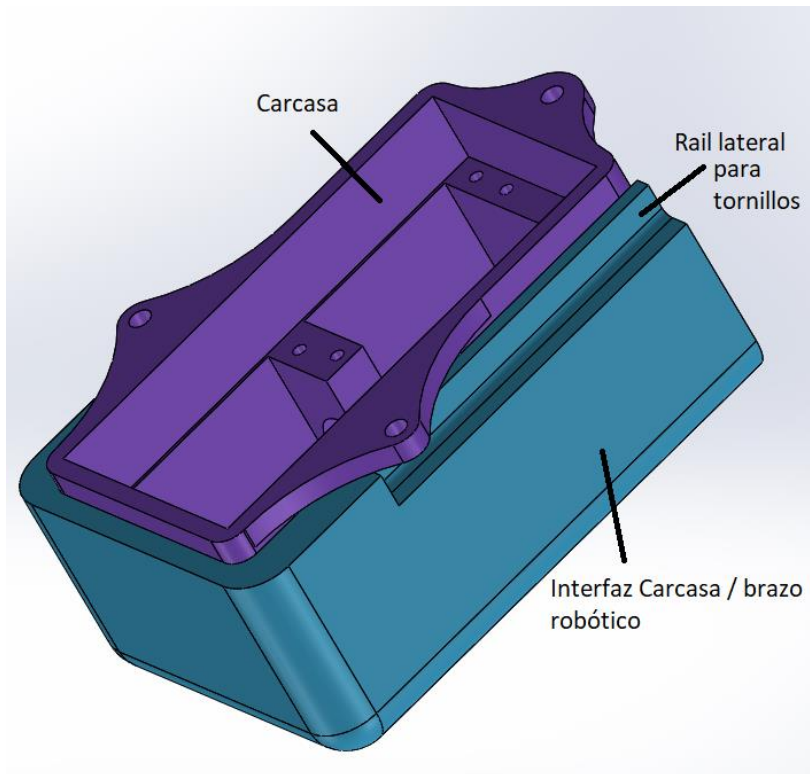


Figura 32: Segundo diseño de la pieza "Interfaz carcasa / brazo robótico" en SolidWorks

De esta manera, añadiendo esos railes externos laterales en ambas piezas, se consiguió un mecanismo preciso, fácil y rápido para el acople entre ellas.

6.2.5 Pieza "cubierta"

Como se mencionó al principio de este capítulo, a lo largo del desarrollo de los distintos prototipos de las piezas que conforman el mecanismo de acople de este proyecto, se vió la necesidad de diseñar una pieza que hiciera de cobertura para los motores, es decir, que no se vieses. Para ello, se diseñó una pequeña "placa" con orificios de un tamaño suficiente que permita la correcta unión entre la carcasa, el disco de metal 25T, el acople articulación / motor y las articulaciones del instrumento EndoWrist.

El fin de esta pieza es puramente estética, ya que lo que

proporciona es una cubierta a la propia carcasa, para que de esta manera no se vean los servomotores que están fijados a la carcasa.

Esta pieza solo tuvo un prototipo (**Figura 33**):

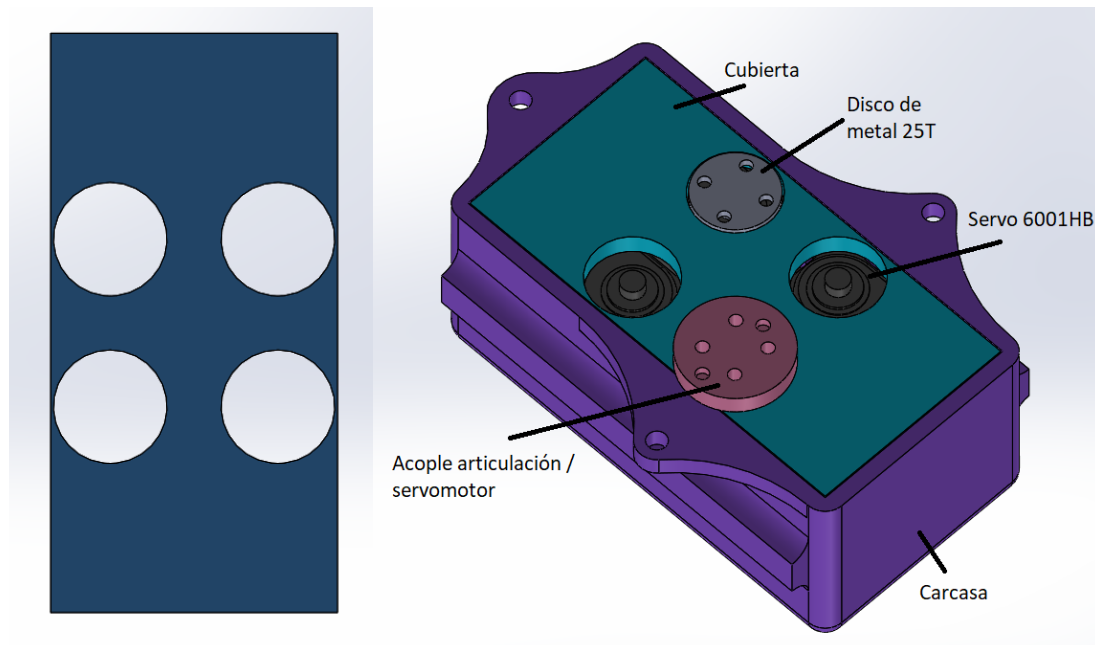


Figura 33: Prototipo de la pieza "cubierta" en SolidWorks

6.3 Prototipo funcional

Después de la impresión de los prototipos, se encontró el prototipo final y funcional y se procedió al montaje del sistema al completo.

Primero, se imprimió el prototipo final de la pieza "**acople articulación / motor**" y se unió a los discos de metal 25T, gracias a 2 tornillos que venían con ellos. La unión de estas piezas lo denominamos Sistema 1 (**Figura 34**).



Figura 34: Sistema 1

Luego, se imprimió el prototipo final de la "**carcasa**", se introdujeron los 4 servomotores, sacando sus respectivos cables por el orificio lateral destinado a ello. Posteriormente, se atornillaron los servomotores y se quedó un sistema, Sistema 2, fijo y estable (**Figura 35**).

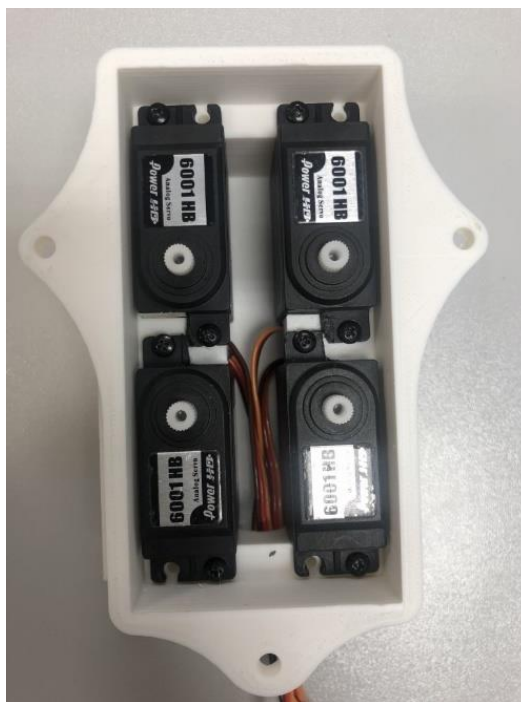


Figura 35: Sistema 2

Al Sistema 2 le falta la pieza "**cubierta**", por lo que se imprimió y se colocó para comprobar su correcta integración (**Figura 36**).



Figura 36: Sistema 2 + Cubierta Final

Finalmente, se unieron ambos sistemas, el segundo con la cubierta final, y se comprobó que encajase perfectamente (**Figura 37**).



Figura 37: Sistema 1 + Sistema 2 + Cubierta Final

Lo siguiente fue imprimir el prototipo final de la pieza "**abazadera**", la cual se imprimió en PLA de color negro, para así diferenciar este mecanismo de cierre que cierra el conjunto, asegurando su unión (**Figura 38**).



Figura 38: Sistema completo

Por último, se imprimió la pieza "**interfaz carcasa / brazo robótico**". Y se comprobó su correcta integración con el brazo robótico UR3. En la **Figura 39** se muestra el prototipo diseñado ya montado en el efector final del robot.

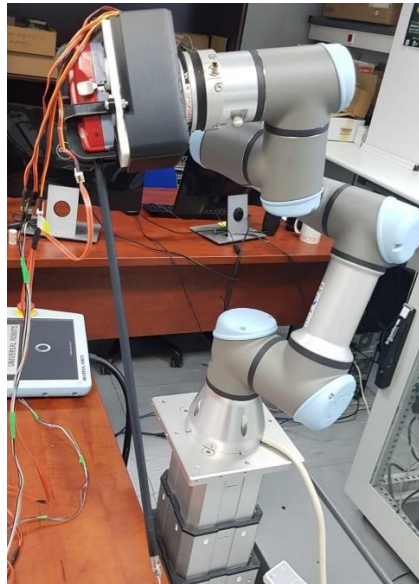


Figura 39: Sistema de acoplamiento de un instrumento EndoWrist para un brazo robótico UR3

6.4 Comunicación software

Se ha hecho uso de GUIDE y se ha creado una interfaz gráfica de usuario como la que aparece en la **Figura 40**, conocida como GUI. Esta interfaz ofrece un control sencillo para mover los servomotores a través de botones (pushbutton), que invocan un evento inmediatamente.

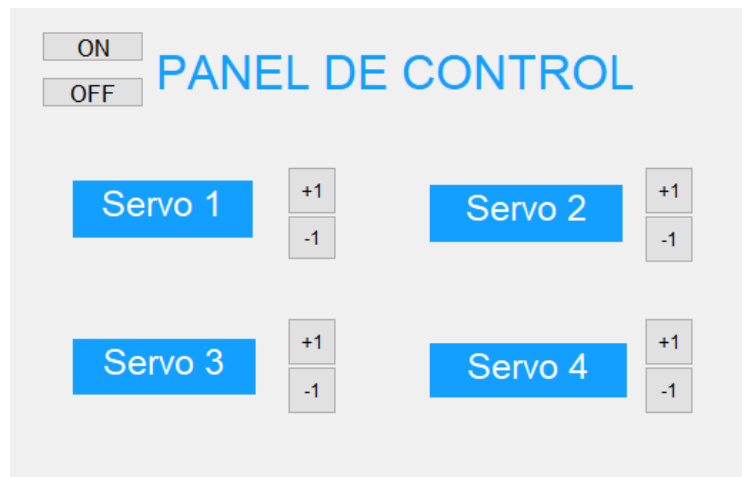


Figura 40: Interfaz Panel de Control

Para el desarrollo de esta interfaz se ha hecho un previo estudio de rango de movimiento de los servomotores y la búsqueda de su máximo y mínimo, siendo 1922 y 922 respectivamente.

Una vez obtenido el rango de movimiento de los servomotores y su asociación con las articulaciones de la pinza, se han creado diferentes botones que realizan callbacks cuyo código está programado para que realice lo que se precisa pulsando cada botón.

Al pulsar en **ON** inicializamos los servomotores en los valores deseados, posición de reposo para el instrumento EndoWrist. Siendo para el servo 1 y 2 su posición de reposo en 1422 microsegundos; para el servo 3 su posición de reposo es 922 y para el servo 4 es 1922.

El botón **OFF** sirve para finalizar ROS y así dejar de recibir datos.

Con los botones **+1** y **-1** de cada servo lo que se consigue es subir o disminuir en un valor la posición del servo, considerando que no estemos en el máximo de posición, para el caso de aumentar; o no estemos en el mínimo, para el caso de disminuir.

6.5 Conclusión

En este capítulo se ha descrito al detalle la evolución de cada uno de las piezas que componen el mecanismo de acoplamiento diseñado en este proyecto, así como las complicaciones encontradas a lo largo de su proceso. Así como la interfaz de usuario creada para el control de los servomotores que controlan las articulaciones de la pinza.

Como conclusión, destacar que el proceso de los prototipos solo ha evolucionado cuando se ha imprimido en 3D cada pieza y se ha comprobado su estabilidad o no en el sistema. Por ello, ha sido la única manera de encontrar los fallos de cada prototipo y de buscar sus posibles soluciones.

7 PRUEBAS EXPERIMENTALES

7.1 Introducción

En este capítulo se va a hablar de las diferentes comprobaciones y experimentos que se han realizados para llegar a obtener el sistema final, así como comprobar el correcto funcionamiento del sistema en conjunto tanto a nivel hardware como a nivel software.

7.2 Funcionamiento de los servomotores

Para encontrar el rango de movimiento de los servomotores se ha hecho uso del “Pololu Maestro Control Center”, herramienta que proporciona acceso a todas las opciones de configuración, así como soporte para control, retroalimentación y depuración en tiempo real de los servomotores conectados al microcontrolador Maestro de Pololu. Gracias a esta herramienta se encontró los rangos de valores donde el servomotor es estable; así como los valores de reposo que hacen que la pinza se encuentre en una determinada posición deseada (**Figura 41** y **Figura 42**).

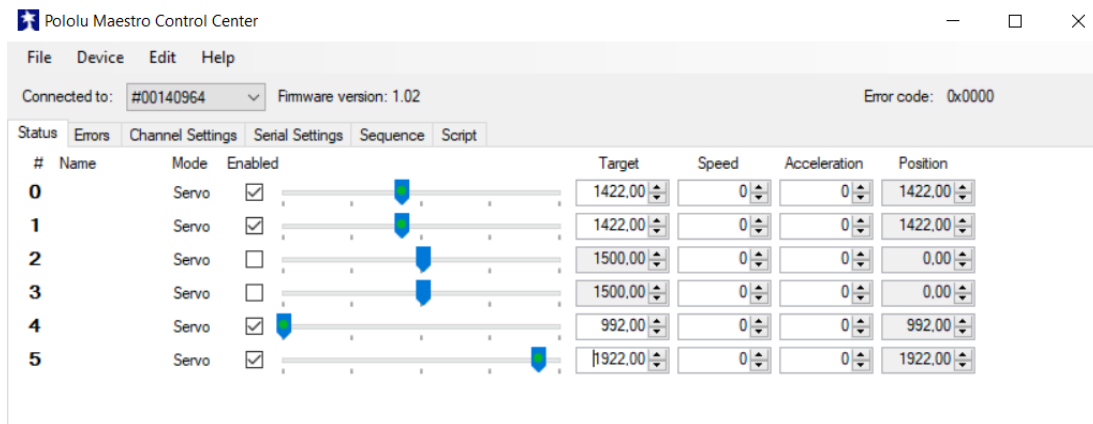


Figura 41: Valores de reposo de los servomotores en el Pololu Maestro Control Center



Figura 42: Posición de reposo del Instrumento EndoWrist

En la Figura 41, la primera columna representan los puertos del microcontrolador, siendo 6 en total. La entrada cero controla la articulación superior derecha de la pinza, la entrada 1 controla la articulación superior derecha, la entrada 4 controla la articulación inferior izquierda y la entrada 5 controla la articulación inferior derecha. (**Figura 43**) .



Figura 43: Relación entradas-servomotores

Para comprobar el correcto funcionamiento se han realizado pruebas a partir de una posición de reposo (en $t=0$ segundos) y se alcanzan dos posiciones seleccionadas de interés en ($t=1$ y $t=2$ segundos). En estas pruebas, el “Pololu Maestro Control Center” controló los movimientos de las articulaciones de la pinza.

Primero se comprueba el movimiento del **servomotor 1** que controla la articulación superior izquierda de la Figura 43. (**Figura 44, 45 y 46**).

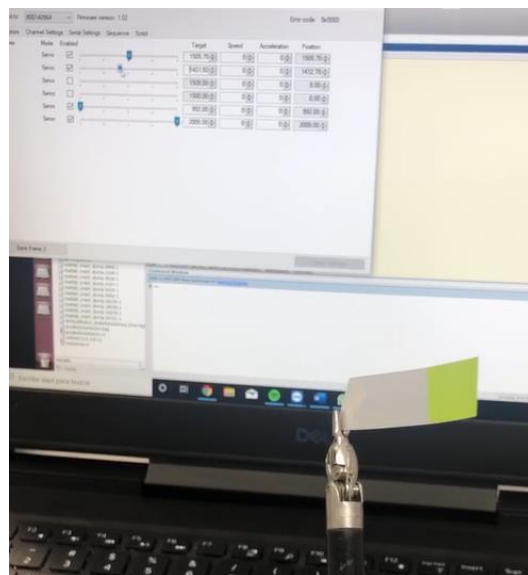


Figura 44: Movimiento del servomotor 1 en posición de reposo con valor de 1422 en $t=0$

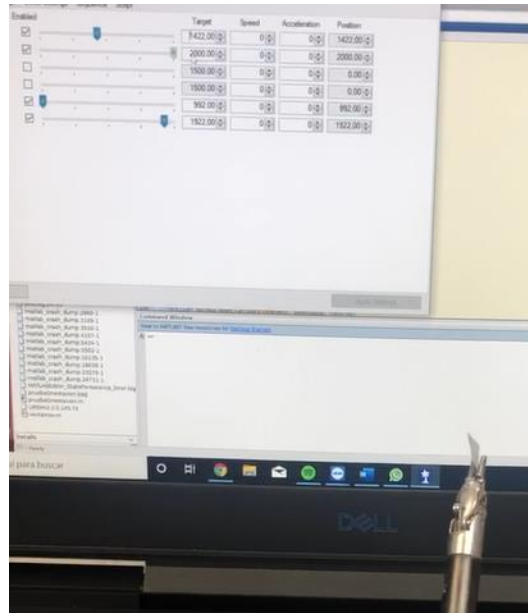


Figura 49: Movimiento del servomotor 2 con posición elegida 1 con valor de 1922 en $t=2$

En tercer lugar, se comprueba el movimiento del **servomotor 3** que controla la articulación inferior izquierda de la Figura 43. (**Figura 50, 51 y 52**).

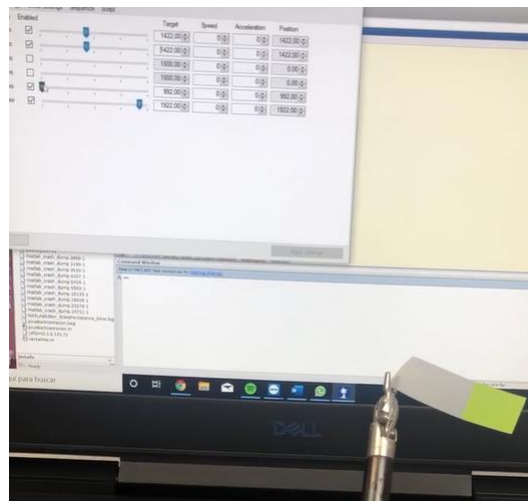


Figura 50: Movimiento del servomotor 3 en posición de reposo de valor de 922 en $t=0$

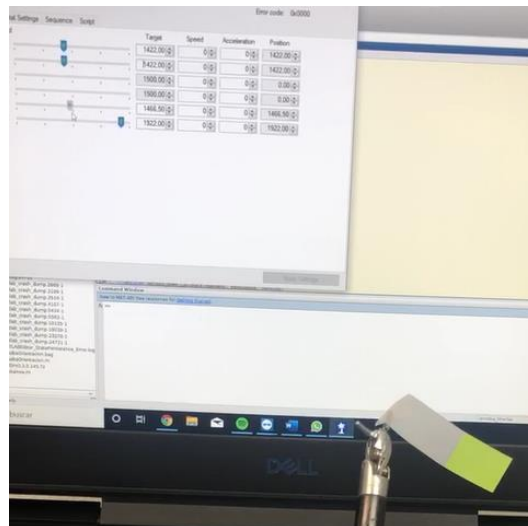


Figura 51: Movimiento del servomotor 3 en posición elegida 1 (Apertura Media) con valor 1422 en $t=1$

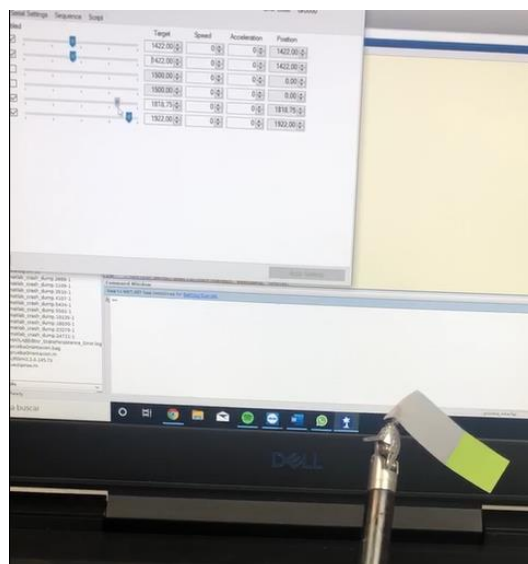


Figura 52: Movimiento del servomotor 3 en posición elegida 2 (Apertura Máxima) con valor 1922 en $t=2$

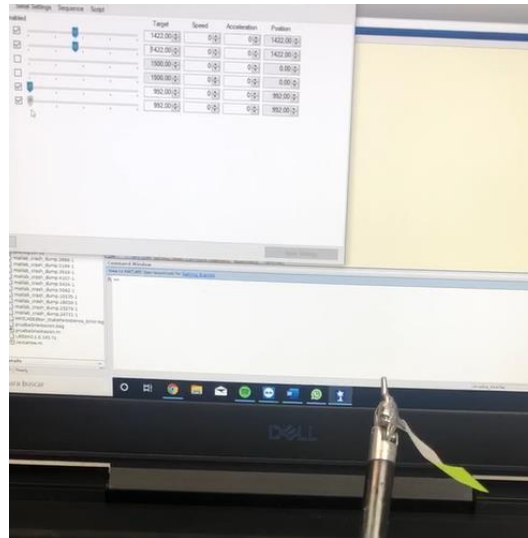


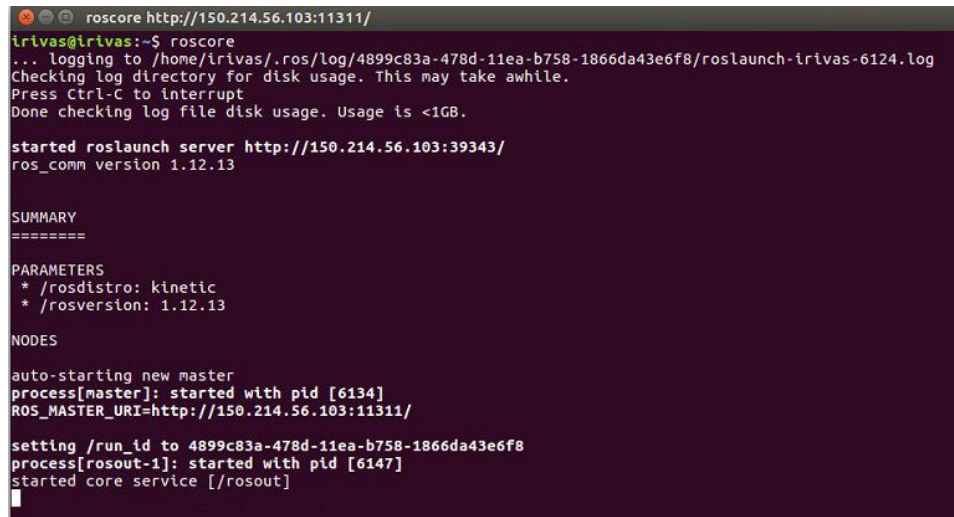
Figura 55: Movimiento del servomotor 3 en posición elegida 2 (Apertura Máxima) con valor 922 en $t=2$

7.3 Nodo de ROS

Para la comunicación entre el microcontrolador y la interfaz creada en Matlab se ha hecho uso de ROS, reutilizando un nodo de ROS ya creado para un antiguo proyecto del grupo de Investigación de Robótica Médica, nodo creado para el manejo de dos motores que controlan la apertura y cierre de una pinza robótica.

Por lo tanto, solo se ha adaptado este código para el control de 4 servomotores en vez de 2 y cambiando el archivo .yaml con la nueva configuración de valores mínimo y máximo encontrados con el "Pololu Maestro Control Center".

Para comprobar el funcionamiento de este nodo para nuestro proyecto primero se ha ejecutado **roscore**, que es necesario tenerlo en ejecución para los nodos se comuniquen (**Figura 56**).



```

roscore http://150.214.56.103:11311/
irivas@irivas:~$ roscore
... logging to /home/irivas/.ros/log/4899c83a-478d-11ea-b758-1866da43e6f8/roslaunch-irivas-6124.log
Checking log directory for disk usage. This may take awhile.
Press Ctrl-C to interrupt
Done checking log file disk usage. Usage is <1GB.

started roslaunch server http://150.214.56.103:39343/
ros_comm version 1.12.13

SUMMARY
=====

PARAMETERS
* /rostdistro: kinetic
* /rosversion: 1.12.13

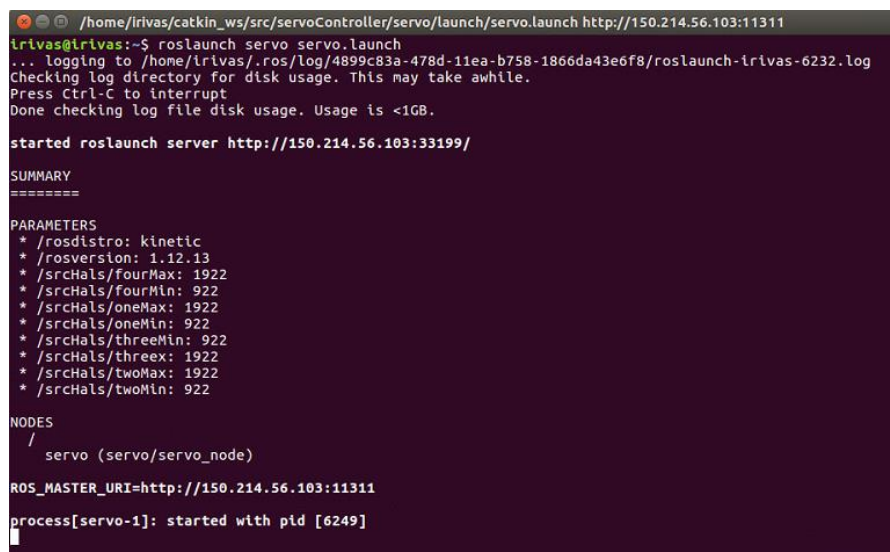
NODES
auto-starting new master
process[master]: started with pid [6134]
ROS_MASTER_URI=http://150.214.56.103:11311/

setting /run_id to 4899c83a-478d-11ea-b758-1866da43e6f8
process[rosout-1]: started with pid [6147]
started core service [/rosout]

```

Figura 56: Ejecución del comando roscore

Luego, se ejecutó en otro terminal el comando **roslaunch servo servo.launch**, herramienta que inicia múltiples nodos ROS de forma local y remota (**Figura 57**).



```

/home/irivas/catkin_ws/src/servoController/servo/launch/servo.launch http://150.214.56.103:11311
irivas@irivas:~$ roslaunch servo servo.launch
... logging to /home/irivas/.ros/log/4899c83a-478d-11ea-b758-1866da43e6f8/roslaunch-irivas-6232.log
Checking log directory for disk usage. This may take awhile.
Press Ctrl-C to interrupt
Done checking log file disk usage. Usage is <1GB.

started roslaunch server http://150.214.56.103:33199/

SUMMARY
=====

PARAMETERS
* /rostdistro: kinetic
* /rosversion: 1.12.13
* /srcHals/fourMax: 1922
* /srcHals/fourMin: 922
* /srcHals/oneMax: 1922
* /srcHals/oneMin: 922
* /srcHals/threeMin: 922
* /srcHals/threex: 1922
* /srcHals/twoMax: 1922
* /srcHals/twoMin: 922

NODES
/
  servo (servo/servo_node)

ROS_MASTER_URI=http://150.214.56.103:11311

process[servo-1]: started with pid [6249]

```

Figura 57: Inicialización nodos de ROS

En la figura 57 se ha inicializado los nodos de ROS y se puede comprobar que los parámetros configurados para el proyecto del .yaml.

Ahora comprobamos que nuestro nodo esté conectado, con el comando **rostopic list**; así como los topics con el comando **rostopic list**. (**Figura 58**).

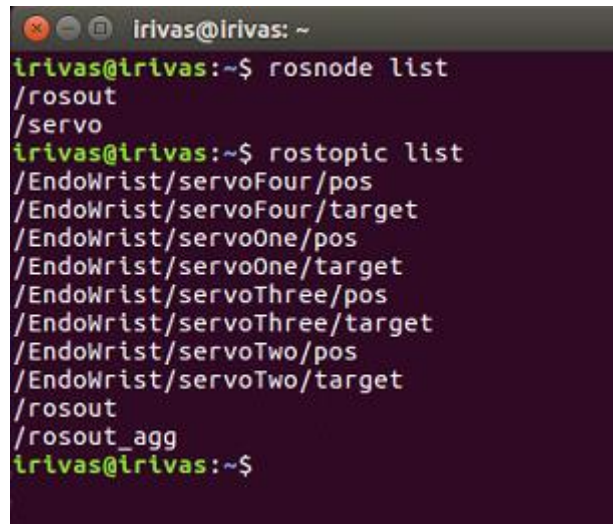
A terminal window with a dark background and light green text. The prompt is 'irivas@irivas: ~'. The first command is 'rostopic list', which outputs '/rosout' and '/servo'. The second command is 'roscall list', which outputs a list of topics: '/EndoWrist/servoFour/pos', '/EndoWrist/servoFour/target', '/EndoWrist/servoOne/pos', '/EndoWrist/servoOne/target', '/EndoWrist/servoThree/pos', '/EndoWrist/servoThree/target', '/EndoWrist/servoTwo/pos', and '/EndoWrist/servoTwo/target'. The prompt returns to 'irivas@irivas: ~\$'.

Figura 58: Lista de nodos y topics activos

Finalmente, a través del comando **rostopic echo** seguido del nombre del topic que se quiera leer, este comando nos imprime mensajes en pantalla donde podemos ver la posición actual de cada servomotor. La **Figura 59** es una prueba para los servomotores 1 y 2.

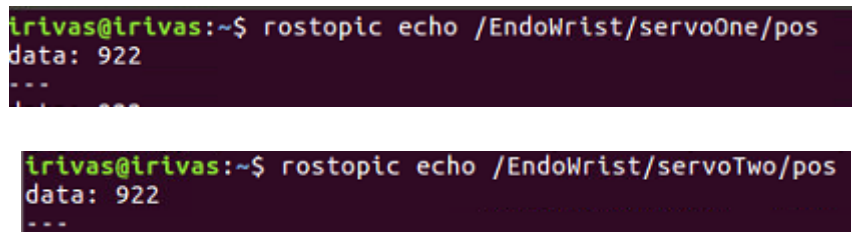
Two terminal window screenshots. The first shows the command 'rostopic echo /EndoWrist/servoOne/pos' and the output 'data: 922' followed by '---'. The second shows the command 'rostopic echo /EndoWrist/servoTwo/pos' and the output 'data: 922' followed by '---'.

Figura 59: Valores iniciales de servomotores 1 y 2 a través del nodo de ROS

7.4 Interfaz de usuario de MATLAB

Se ha creado una interfaz de usuario a través de la herramienta GUIDE de Matab como se explica en el apartado 4 del capítulo 6. Esta interfaz fue creada para crear una comunicación directa del usuario con los servomotores, sirviendo esta interfaz de intermediario entre el usuario, el cuál solo presiona un botón, y los nodos de ROS, los cuales a su vez se comunican directamente con el

microcontrolador.

Para ver si la interfaz funciona correctamente se ha ejecutado el .m de esta interfaz (**Figura 60**):

```
>> prueba_interfaz  
Initializing global node /matlab_global_node_07999 with NodeURI http://irivas:34829/
```

Figura 60: Inicialización interfaz en Matlab

Se comprueba también el correcto funcionamiento de los botones creados para el control. En la **Figura 61** se comprueba el funcionamiento del botón OFF:

```
Shutting down global node /matlab_global_node_07999 with NodeURI http://irivas:34829/
```

Figura 61: Botón OFF presionado

Para la visualización del correcto funcionamiento de los botones creados se ha hecho uso del comando fprintf en cada función asociada a cada botón, para así visualizar si el botón creado funciona o no. En cada botón se puso un texto diferente dependiendo del servomotor y del botón presionado (+1 ó 1), siendo para el servomotor 1 presionando el botón +1 un texto de "El valor del servomotor 1 sube" y presionando el botón -1 un texto de "El valor del servomotor 1 baja" y así con los cuatro servomotores.

Se fue realizando estas pruebas; para el servomotor uno el resultado obtenido fue:

```
El valor del servomotor 1 sube>>  
El valor del servomotor 1 baja>>
```

Figura 62: Botón +1 y -1 del servomotor 1

```
El valor del servomotor 2 sube>>  
El valor del servomotor 2 baja>>
```

Figura 63: Botón +1 y -1 del servomotor 2

```
El valor del servomotor 3 sube>>  
El valor del servomotor 3 baja>>
```

Figura 64: Botón +1 y -1 del servomotor 3

```
El valor del servomotor 4 sube>>  
El valor del servomotor 4 baja>>
```

Figura 65: Botón +1 y -1 del servomotor 4

Se comprobó de esta manera el funcionamiento de los botones.

7.5 Conclusión

En este capítulo se ha mencionado las diferentes pruebas realizadas para conseguir la correcta implementación de los servomotores respecto a las articulaciones de la pinza y del software respecto al control de los servomotores, a través del "Pololu Maestro Control Center". Logrando en cada prueba un correcto funcionamiento del movimiento del mismo.

A modo de resumen, destacar que a partir de los experimentos realizados se comprobó que uno de los servomotores, en concreto el servomotor 1, que controla el movimiento de Wristed Yaw, dejó de funcionar. La potencia de la que dispone el servomotor elegido para el proyecto, en su momento era la suficiente, pero el paso del tiempo y pruebas realizadas han llevado al desgaste de este. Se tuvo que sustituir por uno nuevo; por lo tanto, se ve la necesidad de mejorar este motor sustituyéndolo por uno de mayor potencia.

Por otro lado, mencionar que los nodos de ROS y la interfaz de Matlab solo pretenden realizar un funcionamiento básico de control de los servomotores, y no realizar los movimientos de grado de libertad con los que cuenta el instrumento EndoWrist. Siendo la interfaz de usuario un ejemplo extrapolable a un grado de control mayor en futuras líneas del proyecto.

8 CONCLUSIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

8.1 Conclusión

El presente proyecto ha desarrollado un mecanismo de acoplamiento de un instrumento EndoWrist para un brazo robotico UR3, siendo la integración del sistema correcta y eficaz.

A lo largo de la memoria se han ido exponiendo los trabajos realizados y problemas encontrados durante el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado, demostrando que se han alcanzado todos los objetivos expuestos en el anteproyecto.

Se empezó realizando el planteamiento del problema donde se habló del instrumento EndoWrist del que se basa este proyecto así como del robot teledirigido daVinci. Luego, se pasó a exponer el software de diseño elegido para el diseño del mecanismo obtenido así como la elección de la tecnología FDM para la obtencion física del mismo. Posteriormente, se desarrolló la arquitectura hardware y software que ha hecho uso este sistema, detallando cada paso que se ha seguido para lograr el prototipo funcional del mecanismo, así como todos los problemas encontrados por el camino. En el desarrollo del hardware cabe destacar la correcta elección del software de diseño SolidWorks, ya que el mecanismo diseñado posee un grado complejo de diseño el cual resultó

mas sencillo gracias a esta herramienta. Finalmente se pasó una fase de pruebas experimentales en la que se comprobó el correcto funcionamiento e integración del sistema.

Como conclusión, comentar que el mecanismo desarrollado en este proyecto aporta al grupo de Investigación de Robótica Médica la introducción en sus proyectos de una pinza que es capaz de realizar movimientos más complejos que el que se realiza actualmente con las pinzas convencionales, pudiendo así realizar tareas quirúrgicas complejas que puede aportar mucho al sector de la investigación y búsqueda de mejoras.

8.2 Futuras líneas de trabajo

Si bien queda demostrado que el mecanismo diseñado funciona correctamete, se derivan éstos diversos problemas que se plantea como líneas de desarrollo futuro:

- Elección de motores con mayor rango de movimiento, mínimo con un rango de 180 grados, ya que las articulaciones de instrumento EndoWrist necesitan de un rango de movimiento mayor de los 90 grados que se han elegido en este proyecto. Necesitando la articulación que controla el grado de libertad de Rotación (Rotation) de un motor con un rango de movimiento de 360 grados.
- Elección de motores con mayor potencia o al menos para una de las articulaciones; ya que la articulación de movimiento lateral de la herramienta(Wristed Yaw) necesita de un motor con mayor potencia, ya que el actual acciona la articulación con dificultad.

Este cambio conlleva una reelección del

microcontrolador, buscando uno que sea capaz de proporcionar la entrada de una fuente de alimentación mayor al sistema, la cual necesitará para poder accionar los nuevos motores con mayor potencia.

- Control de las articulaciones de instrumento EndoWrist realizando un desarrollo software con las distintas combinaciones de sus articulaciones para controlar todos los grados de libertad del instrumento.

REFERENCIAS

Cirugía Laparoscópica. Disponible online:
<https://www.fascrs.org/cirugia-laparoscopica>

El primer semestre de 2018 acaba con 46 robots Da Vinci instalados en España. (3 de Septiembre de 2018). ISanidad. Recuperado de: <http://isanidad.com/120554/el-primer-semestre-de-2018-acaba-con-46-robots-da-vinci-instalados-en-espana/>

Hagen, M. E, Stein, H., y Curet M.J. (2014). Introduction to the Robotic System. In: Kim, K.C. *Robotics in General Surgery*. New York: Springer.

Intuitive Surgical, Inc. (2007). Perfil de la compañía Intuitiva Surgical Inc. Sunnyvale, CA, EE. UU., Sitio Web, URL <http://www.intuitivesurgical.com/>

Morente, Lola M. (15 de Abril de 2017). Todo lo que debes saber sobre Da Vinci, el robot quirúrgico. *Expansión*. Recuperado de: <https://www.expansion.com/tecnologia/2017/04/15/58f24ada22601d67308b460b.html>

Negrete, Borja (14 de Noviembre de 2018). La evidencia actual no justifica la inversión en el robot da Vinci. *Redacción Médica*. Recuperado de: <https://www.redaccionmedica.com/secciones/tecnologia/-la-evidencia-actual-no-justifica-la-inversion-en-el-robot-da-vinci--7147>

Rivas-Blanco, I. (2017) *Smart camera robotic assistant for laparoscopic surgery* (tesis doctoral). Universidad de Málaga, Málaga, España.