



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento

Ingeniería de sistemas y automática

Área de Conocimiento

Ingeniería de sistemas y automática

Ingeniería mecánica

Lenguajes y sistemas informáticos

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño e implementación de un mecanismo de control de un instrumento quirúrgico *EndoWrist*.

Grado en

Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Autor: Hugo Torralba Galindo

Tutor: Irene Rivas Blanco

Cotutor Estebanez Campos, María Belén

MÁLAGA, junio de 2022



**DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL
PROYECTO/TRABAJO FIN DE GRADO**

D./ Dña.: Hugo Torralba Galindo

DNI/Pasaporte: 53927297-W. Correo electrónico: hg_torralba@icloud.com

Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Título del Proyecto/Trabajo: Diseño e implementación de un mecanismo de control de un instrumento quirúrgico EndoWrist.

DECLARA BAJO SU RESPONSABILIDAD

Ser autor/a del texto entregado y que no ha sido presentado con anterioridad, ni total ni parcialmente, para superar materias previamente cursadas en esta u otras titulaciones de la Universidad de Málaga o cualquier otra institución de educación superior u otro tipo de fin.

Así mismo, declara no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual, así como que las fuentes utilizadas han sido citadas adecuadamente.

En Málaga, a 6 de junio de 2022

Fdo.: Hugo Torralba Galindo

Resumen.

Los buenos resultados que se han obtenido en las intervenciones quirúrgicas asistidas por plataformas robóticas en los últimos años, han hecho que aumente el interés y la demanda de estas en los hospitales de todo el mundo.

A nivel mundial, el sistema que lidera el mercado de este tipo de plataformas robóticas es el sistema Da Vinci. Cuenta con una serie de instrumentos quirúrgicos, denominados EndoWrist, en los efectores finales de sus brazos articulados. Estos permiten una serie de movimientos que mejoran y aumentan la precisión y el rango de los mismos. Sin embargo, están diseñados con un sistema de acople exclusivo para el sistema Da Vinci.

Por ello, este Trabajo de Fin de Grado se centra en el desarrollo de un sistema de acoplamiento y control para que un instrumento EndoWrist (Intuitive Surgical Sunnyvale) se pueda acoplar y manejar junto con el brazo robótico UR3 (Universal Robots). El proyecto pretende incorporar este nuevo sistema para que el equipo de investigación de Robótica Médica de la Universidad de Málaga pueda trabajar con él en las investigaciones que actualmente desarrollan.

La realización de este proyecto se ha dividido en tres fases: una primera de estudio del mecanismo, una segunda de diseño hardware y software y, una última de experimentación. En el desarrollo de la primera fase se ha realizado un estudio de la cinemática directa del instrumento y de su geometría. En la segunda fase, se ha diseñado un sistema de acoplamiento que cuenta con cuatro motores y un controlador para actuar sobre los grados de libertad del instrumento, como software de diseño se ha empleado SolidWorks, y como software para el control de los movimientos, Arduino, MatLab y ROS. Finalmente, se ha prototipado y comprobado el correcto funcionamiento del sistema desarrollado.

Palabras claves: Instrumento quirúrgico, brazo robótico, control, diseño

Abstract.

The positive results obtained in surgical interventions assisted by robotic platforms in recent years have raised interest in their use and a demand for them in hospitals across the world.

The worldwide market leader of surgical robotic platforms is the Da Vinci system. It features a series of surgical instruments, named EndoWrist, on the end effectors of its articulated arms which allow for a series of movements that improve their precision and increase their range of motion. They are however, designed with a coupling system exclusive to the Da Vinci technology.

This Research Paper is thus focused on the development of a system of coupling and control so that an EndoWrist instrument (the Intuitive Surgical Sunnyvale) can be coupled and managed together with the UR3 robotic arm (Universal Robots). The project aims to include this new system so that the Medical Robotics research team of the University of Málaga can work with it during its current research efforts.

The project implementation was divided into three phases: A first phase where the mechanism is studied, a second phase of hardware and software design, and a last phase of testing. In the first phase, a study of the instrument's direct kinematics and its geometry was performed. In the second phase, a coupling system featuring four motors and a controller/driver to act upon the instrument's degree of freedom was designed. SolidWorks was employed for the software design, and Arduino, MatLab and ROS software were used for motion control. In the final phase, the prototyping and correct operation of the system were verified.

Keywords: surgical instrument, robotic arm, control, and design.

Índice

1	Introducción.....	7
1.1	Introducción a la cirugía robótica.....	7
1.2	Motivación.....	9
1.3	Objetivos.	9
1.4	Metodología.....	10
2	Análisis general del problema.....	12
2.1	Introducción.	12
2.2	Sistema quirúrgico Da Vinci.....	12
2.3	Instrumento <i>EndoWrist</i>	14
2.4	Brazo robótico UR3.....	17
2.5	Conclusiones.	18
3	Hardware y Software utilizados.....	20
3.1	Introducción.	20
3.2	Dispositivos Hardware.	20
3.2.1	Ultimaker S5.....	20
3.2.2	Motor DC Micro Metal.....	21
3.2.3	Arduino UNO.	21
3.2.4	DFRobot Quad DC Motor Driver Shield.....	23
3.3	Herramientas Software.	24
3.3.1	SolidWorks.	24
3.3.2	Arduino IDE.	24
3.3.3	MatLab.	25
3.3.4	ROS.	25
3.4	Conclusiones	27
4	Diseño del mecanismo de acople.....	28
4.1	Introducción.	28
4.2	Sistema de acoplamiento con el instrumento <i>EndoWrist</i>	28
4.2.1	Pieza “Base de Motores”.....	31
4.2.2	Pieza “Carcasa de Motores”.....	32

4.2.3	Pieza “Acople EndoWrist”.....	33
4.2.4	Pieza “Discos de Conexión”.....	34
4.3	Sistema de acoplamiento al brazo robótico UR3.....	36
4.4	Prototipo funcional.....	39
4.5	Conclusiones	44
5	Arquitectura Software.....	45
5.1	Introducción	45
5.2	Sistema de control del instrumento <i>EndoWrist</i>	45
5.3	Arquitectura ROS.....	48
5.4	Conclusiones	48
6	Conclusiones y futuras líneas de trabajo.....	50
6.1	Conclusiones	50
6.2	Futuras líneas de trabajo.....	51
	Bibliografía.....	53
	Anexo 1. Planos.....	23

Lista de figuras.

Figura 1. Movimientos reproducidos por el instrumento <i>EndoWrist</i>	8
Figura 2. Evolución del sistema quirúrgico Da Vinci.....	8
Figura 3. Componentes del sistema Da Vinci XI: carro quirúrgico (a), carro de visión (b) y consola del cirujano (c).	13
Figura 4. Mandos de control y sistema de visión del cirujano.	13
Figura 5. Instrumento utilizado en laparoscopia convencional.	14
Figura 6. Instrumento EndoWrist.....	15
Figura 7. Grados de libertad del instrumento <i>EndoWrist</i>	15
Figura 8. Discos de control de movimiento del instrumento <i>EndoWrist</i>	16
Figura 9. Representación de movimientos (Roll, Pitch y Yaw) del instrumento <i>EndoWrist</i>	17
Figura 10. Brazo robótico UR3 (Universal Robots).	18
Figura 11. Impresora 3d Ultimaker S5.....	20
Figura 12. Modor DC Micro Metal.	21
Figura 13. Conexionado de la placa Arduino UNO.....	22
Figura 14. Placa DFRobot Quad DC Motor Driver Shield para Arduino UNO. .	23
Figura 15. Acoplamiento del instrumento <i>EndoWrist</i> con el sistema Da Vinci..	28
Figura 16. Sistema de acople y desacople del instrumento <i>EndoWrist</i>	29
Figura 17. Prototipo final del sistema “Acople EndoWrist” en SolidWorks.....	30
Figura 18. Superficie interna de la pieza “Base de Motores”.....	31
Figura 19. Superficie inferior de la pieza “Base de Motores”.....	32
Figura 20. Superficie exterior de la pieza “Carcasa de motores”.....	33
Figura 21. Superficie interior de la pieza “Carcasa de Motores”.....	33
Figura 22. Superficie exterior de la pieza “Acople EndoWrist”.	34
Figura 23. Superficie exterior de la pieza “Disco de Conexión”.....	35
Figura 24. Superficie interior de la pieza “Disco de Conexión”.....	35
Figura 25. Pieza “Acople 1 EndoWrist y UR3”: parte frontal (a) y trasera (b)...	37
Figura 26. Pieza “Acople 2 EndoWrist y UR3”: parte frontal (a) y trasera (b)...	38
Figura 27. Conectores de cables.....	39
Figura 28. Base de Motores.	39
Figura 29. Base + Carcasa de Motores	40

Figura 30. Base + Carcasa de Motores + Acople EndoWrist.	40
Figura 31. Base + Carcasa de Motores + Acople EndoWrist + Discos de conexión.....	41
Figura 32. Sistema de acoplamiento al instrumento EndoWrist completo.....	41
Figura 33. Fijación de la pieza <i>Acople 1 EndoWrist UR3</i> con el brazo robótico	42
Figura 34. Sistema de acoplamiento de un instrumento EndoWrist para un brazo robótico UR3 (I).....	43
Figura 35. Sistema de acoplamiento de un instrumento EndoWrist para un brazo robótico UR3 (II).	44
Figura 36. Panel de control del instrumento	46
Figura 37. Arquitectura ROS.	48

Lista de tablas.

Tabla 1. Velocidad y tiempo de giro de los motores en función del movimiento.	47
---	----

1 Introducción.

1.1 Introducción a la cirugía robótica.

En los últimos años, se ha producido un gran avance de la robótica en diferentes ámbitos y sectores. Uno de ellos es la robótica médica, una rama de la ciencia dedicada a la investigación e implementación de máquinas automatizadas que permitan ayudar a cirujanos y médicos durante el ejercicio de sus funciones.

Los mayores avances producidos dentro de la robótica médica se dan en el campo de la cirugía. La cirugía robótica ha permitido realizar intervenciones quirúrgicas de una forma menos invasiva y con una reducción en el tiempo de intervención y del periodo de postoperatorio. Esta mejora es consecuencia de la mayor precisión y miniaturización de los sistemas que permiten al cirujano acceder a estructuras dentro del cuerpo humano que, dadas las limitaciones del mismo, no se pueden alcanzar o son muy difíciles de realizar.

El campo donde el impacto ha sido mayor dentro de la cirugía robótica es el de la especialidad de urología, obteniéndose resultados excelentes en distintos tipos de intervenciones como la prostatectomía radical, la nefrectomía parcial, la nefrectomía de donante vivo y la pieloplastia, entre otras muchas. Las principales mejoras frente al uso de métodos tradicionales se encuentran en: la extirpación más precisa de tejidos tumorales, en la rápida recuperación de la función sexual y en la menor pérdida de sangre. Sin embargo, existen otros campos donde este tipo de cirugía ha provocado cambios notables como en la cirugía general, cardiaca, torácica, ginecológica y ortopédica, entre otros [1,2].

Dentro de este tipo de sistemas robóticos destaca la plataforma quirúrgica Da Vinci (desarrollada por Intuitive Surgical Sunnyvale). Este sistema teleoperado cuenta con cuatro brazos articulados los cuales portan instrumental quirúrgico y una cámara laparoscópica, siendo el cirujano el encargado de transmitir comandos desde la consola de operación que ejecuten el movimiento de las articulaciones. El instrumento portado por los brazos articulados ofrece un amplio rango de movimiento, con dos grados de libertad adicionales respecto de

los instrumentos convencionales. Los dispositivos utilizados en la laparoscopia convencional solo permiten la entrada/salida y la rotación de los mismos, mientras que con la incorporación de la plataforma Da Vinci y su instrumental *EndoWrist*, se posibilita además la capacidad de reproducir la acción de la muñeca humana (Figura 1) [3].

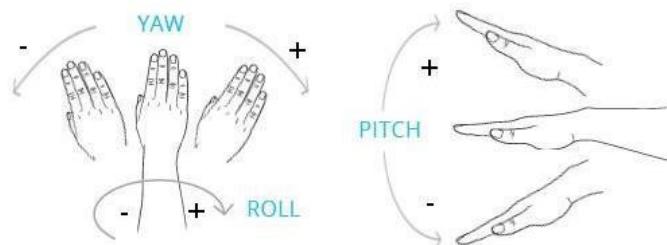


Figura 1. Movimientos reproducidos por el instrumento *EndoWrist*.

Desde 1999 hasta la actualidad, el sistema quirúrgico Da Vinci ha revolucionado la cirugía robótica en Estados Unidos y el resto del mundo, ofreciendo resultados cada vez mejores con el desarrollo de las sucesivas plataformas robóticas (Figura 2).

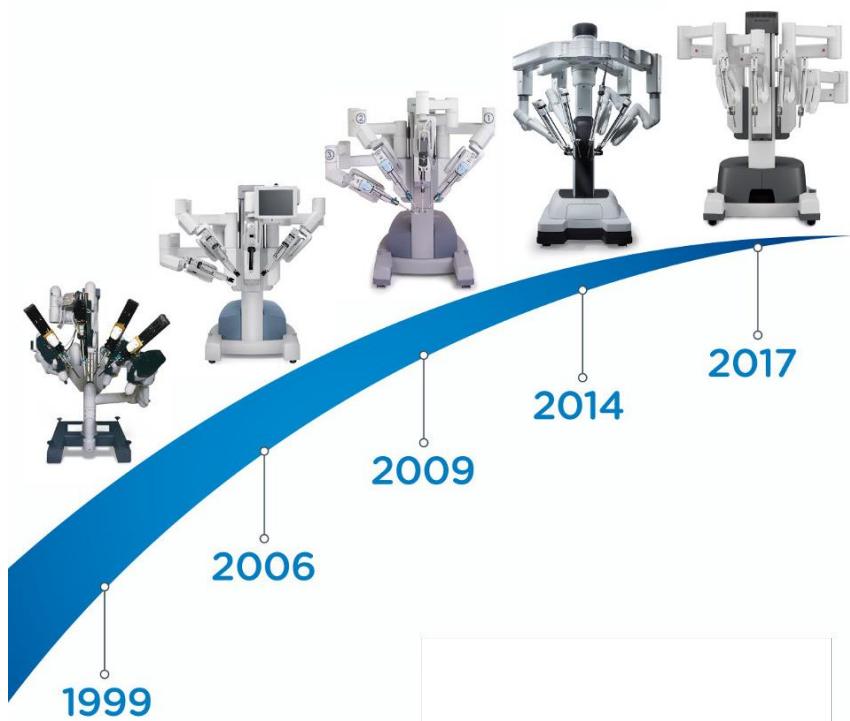


Figura 2. Evolución del sistema quirúrgico Da Vinci.

1.2 Motivación.

La motivación de este Trabajo de Fin de Grado reside en aumentar el conjunto de herramientas que permitan desarrollar y facilitar los estudios realizados por el equipo de investigación de Robótica Médica de la Universidad de Málaga. Dentro de sus líneas de investigación, se encuentra en fase de desarrollo la introducción de brazos robóticos en la cirugía laparoscópica robótica. Estos brazos robóticos portan actualmente una serie de instrumentos convencionales con un rango de movimiento limitado.

Con este proyecto se pretende introducir un mecanismo de acoplamiento y control para el instrumento quirúrgico *EndoWrist*, dotado de un mayor número de grados de libertad, con un brazo robótico UR3 (desarrollado por Universal Robots). El sistema permitirá la reproducción de movimientos más complejos en la cirugía robótica.

1.3 Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado consiste en diseñar un sistema de acoplamiento para el instrumento *EndoWrist* y un brazo robótico UR3. Incluyendo un sistema electro-mecánico controlado que permita accionar los distintos grados de libertad desde un interfaz gráfico. El movimiento de los grados de libertad del extremo final del instrumento se realizará mediante el control de un conjunto de motores. Este objetivo general se puede dividir en los siguientes objetivos específicos:

1. Diseño y fabricación del mecanismo de acople entre la herramienta y el brazo robótico. Para cumplir con el desarrollo de este primer objetivo, se han realizado las siguientes fases de trabajo:
 - Estudio de la geometría y características del dispositivo *EndoWrist* y búsqueda de actuadores que cumplan con los requerimientos estudiados.
 - Diseño y fabricación de un prototipo final mediante el software SolidWorks y la impresión 3D.

- Implementación del instrumento *EndoWrist* y el efecto final del brazo robótico UR3 con el sistema diseñado y, finalmente, verificar el correcto acoplamiento.
2. Desarrollo de un programa de control de movimiento de los motores para accionar los grados de libertad de la herramienta. Esto se realizará mediante un software implementado en Arduino, ROS y MatLab. Previamente será necesario realizar un estudio para conocer la cinemática directa del instrumento, la cual especifica los giros necesarios que deben realizar cada uno de los motores para accionar los distintos grados de libertad permitidos. La consecución de este último objetivo, ha constado de las siguientes fases de trabajo:
 - Obtención del modelo cinemático del instrumento *EndoWrist*.
 - Estudio de la conexión de las diferentes aplicaciones utilizadas para comunicar el interfaz gráfico y los motores, así como de los diferentes componentes hardware requeridos.
 - Elaboración de un programa que realice el movimiento de cada uno de los grados de libertad del instrumento y de un panel gráfico que permita el control del mismo.
 - Verificación de la arquitectura software final.

1.4 Metodología.

Una vez realizada la introducción y establecidos los objetivos y el alcance de este trabajo de fin de grado, se pasará a realizar un planteamiento del problema que se desarrolla en el **capítulo 2** denominado ***Planteamiento del problema***. En este capítulo se realiza un breve estudio de la plataforma robótica Da Vinci, de la herramienta del sistema y del brazo robótico para el cual se va a realizar el diseño del sistema de acoplamiento.

A continuación, en el **capítulo 3, *Hardware y Software utilizados***, se realizará una presentación del hardware y el software utilizados para la elaboración tanto del sistema de acoplamiento, como del mecanismo de control del instrumento.

Seguidamente, en el **capítulo 4, Diseño del mecanismo de acoplamiento**, se realiza un análisis de la solución final del sistema diseñado. En primer lugar, se procede a estudiar las características y limitaciones del instrumento y, finalmente, se presentarán todas las piezas y su funcionalidad dentro del sistema final.

Una vez desarrollado el sistema de acoplamiento, en el **capítulo 5, Arquitectura Software**, se pasa a estudiar la solución software que realiza el control de los grados de libertad desde un interfaz gráfico, utilizando un microcontrolador que accione los motores.

Posteriormente, se implementará el prototipo final en el brazo robótico UR3 y se comprobará el correcto funcionamiento de la solución tanto hardware como software en el **capítulo 6, Pruebas experimentales**.

Finalmente, en el último capítulo del proyecto, en el **capítulo 7, Conclusiones y futuras líneas de investigación**, se expondrá una conclusión del proyecto elaborado y se sugerirán diversas líneas futuras de investigación que derivan de este proyecto.

2 Análisis general del problema.

2.1 Introducción.

En este capítulo se procede a realizar un estudio de los puntos que describen el problema a resolver en este proyecto. Para ello se hará una descripción del sistema quirúrgico Da Vinci, de la herramienta *EndoWrist* que porta dicho sistema quirúrgico y, del brazo robótico UR3 para el cual se pretende diseñar el sistema de acoplamiento.

2.2 Sistema quirúrgico Da Vinci.

Desde finales del siglo XX hasta hoy en día, el sistema robótico líder en el campo de la robótica médica y, más concretamente en la cirugía robótica, es el sistema Da Vinci. En el último año, el número de instalaciones del sistema robótico superaron las 1.300 unidades, alcanzando los 6.700 sistemas robóticos disponibles en todo el mundo. A este incremento de unidades también le acompaña un incremento del número de intervenciones realizadas. Solo en España, el número de intervenciones totales ha aumentado un 37% con respecto al año anterior [4].

El aumento de sistemas e intervenciones se debe en primer lugar, a los buenos resultados obtenidos en las mismas, lo que ha aumentado la confianza tanto en cirujanos como en pacientes. En segundo lugar, al aumento en la formación tecnológica que, mediante software, permite a los cirujanos mejorar sus destrezas y desarrollar aptitudes quirúrgicas.

La excelencia de los resultados que se obtienen con este sistema se debe a la precisión con la que realiza las intervenciones. El sistema Da Vinci es un sistema robótico teleoperado que incorpora un sistema de control y visión, que le permite al cirujano eliminar el temblor fisiológico y obtener una visión de alta definición en tres dimensiones [5].

Este sistema está compuesto por tres subsistemas distintos (Figura 3) los cuales están presentes en todas las generaciones comercializadas hasta la fecha:



Figura 3. Componentes del sistema Da Vinci XI: carro quirúrgico (a), carro de visión (b) y consola del cirujano (c).

- 1. Consola del cirujano.** Mediante dos mandos y un sistema de visión, el cirujano controla el movimiento de los brazos del robot (Figura 4). El movimiento de las manos activa los motores y sensores del sistema, permitiendo transferir a los instrumentos un movimiento preciso.

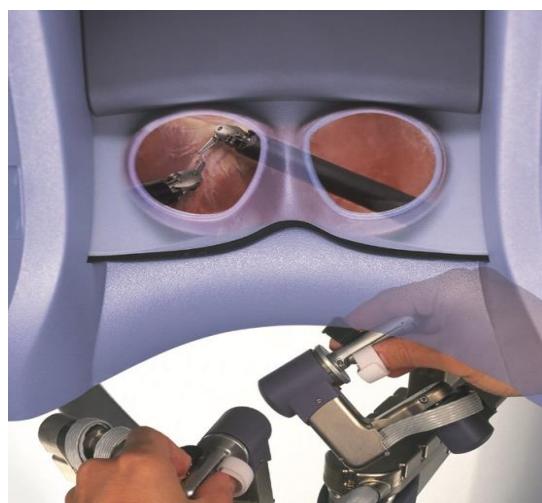


Figura 4. Mandos de control y sistema de visión del cirujano.

- 2. Carro quirúrgico.** Formado por cuatro brazos articulados, tres de ellos portan instrumental quirúrgico (*EndoWrist*) y, uno de ellos un sistema de visión por fibra óptica. Los brazos están diseñados siguiendo la anatomía de un brazo humano (hombro, codo y muñeca) proporcionando tres grados de libertad.
- 3. Carro de visión.** Compuesto por un computador encargado del procesamiento de las imágenes. Este sistema proporciona una visión tridimensional con profundidad de campo y, permite controlar el enfoque, luminosidad y otras características de la imagen.

2.3 Instrumento *EndoWrist*.

Los instrumentos utilizados en la cirugía laparoscópica convencional (Figura 5) poseen un rango de movimiento muy limitado. Estos instrumentos únicamente pueden abrir y cerrar su extremo. El cirujano es el encargado de orientar manualmente la herramienta de forma que, este movimiento, queda limitado por su brazo y muñeca. Sin embargo, con los instrumentos quirúrgicos *EndoWrist* (Figura 6), patentados por Intuitive Surgical, además de los movimientos producidos por las articulaciones de la plataforma, cuentan con 3 grados de libertad que amplían el rango de movimiento con respecto al instrumental convencional. Existen diferentes accesorios como tijeras, pinzas, portaagujas, instrumentos de cauterio monopolar y aplicadores de clips entre otros.



Figura 5. Instrumento utilizado en laparoscopia convencional.



Figura 6. Instrumento EndoWrist.

Los grados de libertad que ofrece el instrumento EndoWrist son: roll, pitch y yaw (Figura 7). Estos permiten realizar un movimiento durante la cirugía incluso mayor que el de la muñeca humana. El control de los movimientos articulares se realiza mediante el giro de una serie de discos instalados en la herramienta (Figura 8).

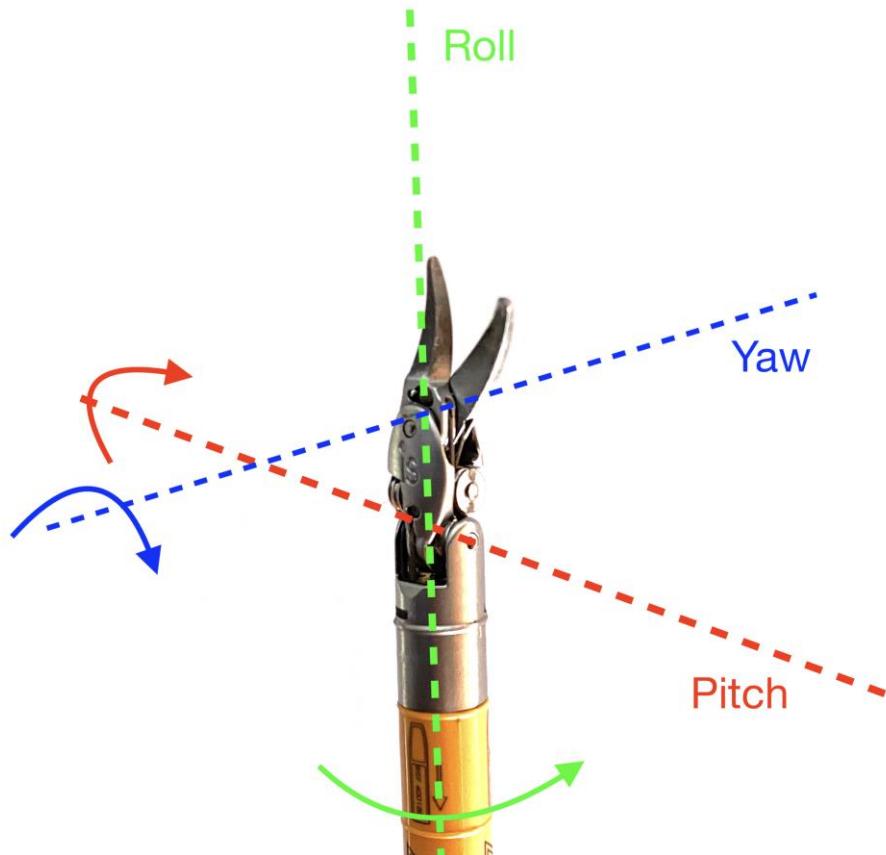


Figura 7. Grados de libertad del instrumento *EndoWrist*.

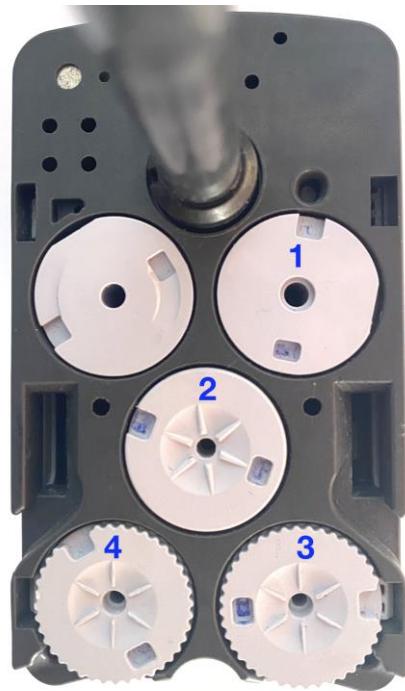


Figura 8. Discos de control de movimiento del instrumento *EndoWrist*.

Como se puede apreciar en la Figura 8, de los cinco discos que posee el dispositivo, solo cuatro de ellos intervienen en el movimiento de la punta del mismo. Dependiendo del movimiento que se desee realizar, se requiere un giro con un sentido y un desplazamiento angular determinado de cada uno de los discos del instrumento. Por ello, se ha realizado un estudio de la cinemática directa del mismo, la cual será necesaria posteriormente para el control del sistema.

A continuación, se enumeran los movimientos que se pueden realizar con el instrumento y, la actuación necesaria para su obtención (Figura 9). En primer lugar, el movimiento **roll** se ejecuta mediante un giro del disco 1 y, representa la rotación de la muñeca. El sentido de giro de la herramienta es el inverso al del giro del disco. En segundo lugar, el movimiento **pitch** es más complejo y representa la flexión de la muñeca. Para su realización se requiere el giro de los discos 2, 3 y 4. Los discos 2 y 3 realizan el giro en el mismo sentido mientras que el disco 4 lo realiza en sentido contrario. Por otro lado, el desplazamiento angular realizado por los discos 3 y 4 se corresponde con la mitad del desplazamiento angular realizado por el disco 2. En tercer lugar, el movimiento **yaw** representa la inclinación de la mano humana. Su ejecución se realiza girando los discos 3 y 4 cada uno en un sentido diferente. Finalmente, la

apertura y cierre del instrumento se realiza mediante la actuación de los discos 3 y 4, los cuales deben girar en el mismo sentido.

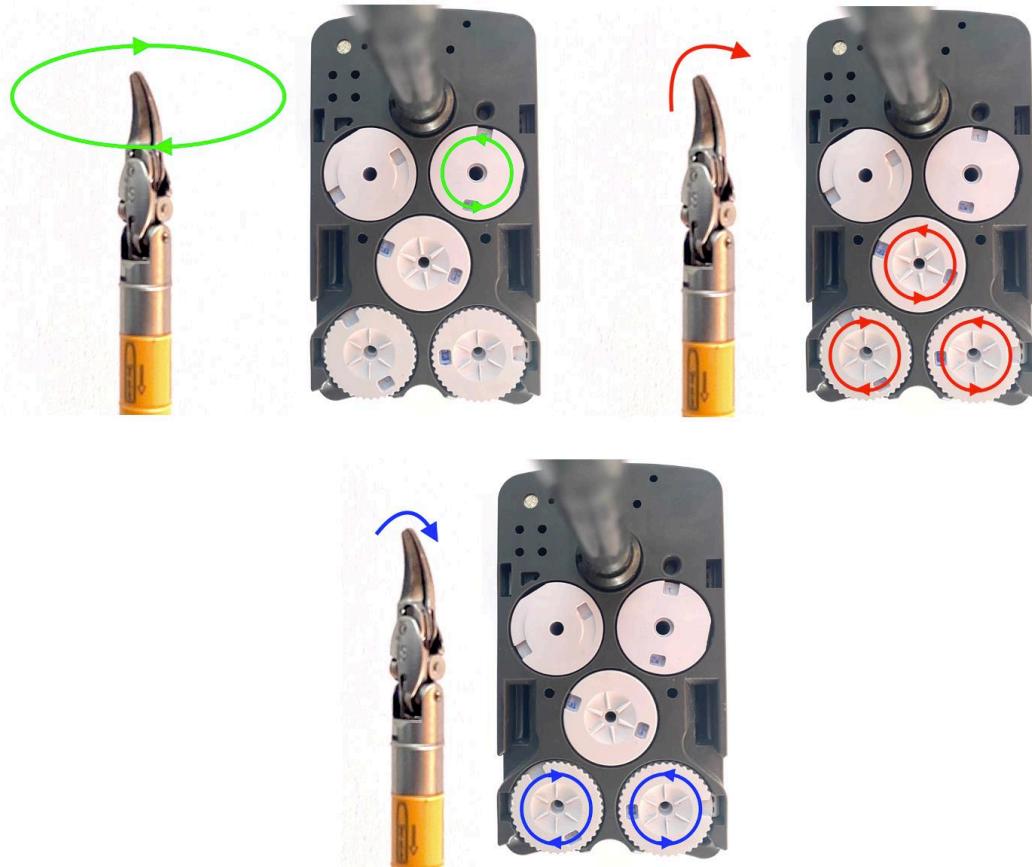


Figura 9. Representación de movimientos (Roll, Pitch y Yaw) del instrumento *EndoWrist*.

La realización de este proyecto se realiza en base al estudio de un instrumento *EndoWrist* de la plataforma Da Vinci XI, cuyo accesorio son unas tijeras monopolares curvas (Monopolar Curved Sicssors) de un diámetro de 8 mm. A partir del mismo, se han realizado las medidas y pruebas para la obtención de una solución final de un mecanismo de acoplamiento y control. Este instrumento ha sido cedido al grupo de investigación de Robótica Médica de la Universidad de Málaga por el Hospital Civil de Málaga.

2.4 Brazo robótico UR3.

El brazo robótico para el cual se realiza el sistema de acoplamiento es el modelo UR3 de Universal Robots (Figura 10). Es un robot de alta precisión que

puede trabajar en áreas de poco espacio y con cargas de más de 3 kg, tiene un rango de radio de 500 mm y, está dotado de 6 grados de libertad, con una rotación de ± 360 grados en todas sus articulaciones y una rotación infinita en el efecto final. Este brazo robótico se utiliza en la industria para realizar operaciones que requieren una alta precisión como la soldadura de componentes electrónicos. Por este motivo, este brazo robótico es ideal para realizar operaciones quirúrgicas donde la precisión es esencial.

Mediante este proyecto, se pretende dotar al brazo robótico UR3 de la posibilidad de utilizar los instrumentos quirúrgicos del sistema Da Vinci para poder trabajar con ellos.



Figura 10. Brazo robótico UR3 (Universal Robots).

2.5 Conclusiones.

En este capítulo se ha realizado un estudio de aquellos puntos de gran importancia para la realización del proyecto. En primer lugar, se ha obtenido una primera aproximación del funcionamiento del sistema Da Vinci y de los

elementos que lo conforman. En segundo lugar, se ha realizado un estudio del instrumento *EndoWrist* para el cual se procede a realizar el diseño de un sistema de acoplamiento. También se ha podido conocer el modelo cinemático del mismo para poder elaborar posteriormente un programa que permita su utilización. Y por ultimo, se ha presentado la plataforma robótica UR3 para la cual se realiza el diseño.

Este proyecto pretende incorporar en los equipos de investigación un sistema de acoplamiento de un instrumento quirúrgico *EndoWrist*, el cual ha obtenido resultados excelentes en cirugías, para un brazo robótico comercial. Sin embargo, mediante la modificación del sistema se podría extender su uso a diferentes brazos robóticos.

3 Hardware y Software utilizados.

3.1 Introducción.

Con el objetivo de poder diseñar y controlar el sistema se requiere una descripción y análisis previo de los dispositivos y herramientas, tanto hardware como software, que serán utilizadas durante la elaboración del proyecto. Para ello, se procede a exponer cuales han sido los motivos por los que se han seleccionado y la utilidad de los mismos en la solución final.

3.2 Dispositivos Hardware.

3.2.1 Ultimaker S5.

Para la realización de las piezas que componen el diseño del sistema de acoplamiento se ha empleado la impresión 3D mediante el dispositivo Ultimaker S5 (Figura 11) del laboratorio de Robótica Médica que se encuentra en el Parque Tecnológico de Málaga.



Figura 11. Impresora 3d Ultimaker S5.

Esta impresora 3D se caracteriza por la presencia de unos sensores de detección de filamento, un sistema de núcleo de impresión intercambiable, un

cabezal de extrusión doble y una calibración automática de la bandeja que permite la impresión de piezas con alta precisión.

3.2.2 Motor DC Micro Metal.

Para poder girar los discos del instrumento *EndoWrist*, que permiten accionar los grados de libertad del mismo, se han utilizado cuatro motores de corriente continua. La selección de los motores se ha basado en dos aspectos claves, la distancia limitada entre los ejes de los discos del instrumento *EndoWrist* y el par necesario para girar los mismos.

El dispositivo seleccionado consiste en el Motor DC Micro Metal de corriente continua con reductora 50:1 serie LP (Figura 12). Este motor cuenta con unas dimensiones reducidas (4 x 10 x 12 mm) y un par suficiente para poder accionar los discos del instrumento. Este modelo seleccionado también cuenta con un peso y un consumo reducido lo cual lo hacen ideal para incorporarlo en este proyecto.



Figura 12. Motor DC Micro Metal.

3.2.3 Arduino UNO.

Para la tarea del control de los motores, y de esta forma poder controlar los grados de libertad del instrumento, se ha seleccionado el microcontrolador Arduino UNO (Figura 13). Este microcontrolador ha sido elegido por la facilidad

de su programación, gracias a un lenguaje basado en C++, que permite al usuario generar un código de una forma más sencilla.

Esta placa posee 14 pines digitales de entrada / salida, de los cuales 6 los puede utilizar como salidas PWM, 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reset.

Por otro lado, su selección también se ha basado en los dispositivos conocidos como Escudos (Shields) o mochilas que se pueden incorporar. Estos dispositivos consisten en una serie de placas que se conectan a la placa principal para añadirle una infinidad de funciones. En este proyecto se ha utilizado una de estas placas para poder realizar el control de la alimentación de los motores y, de esta forma variar su velocidad y sentido de giro de forma independiente.

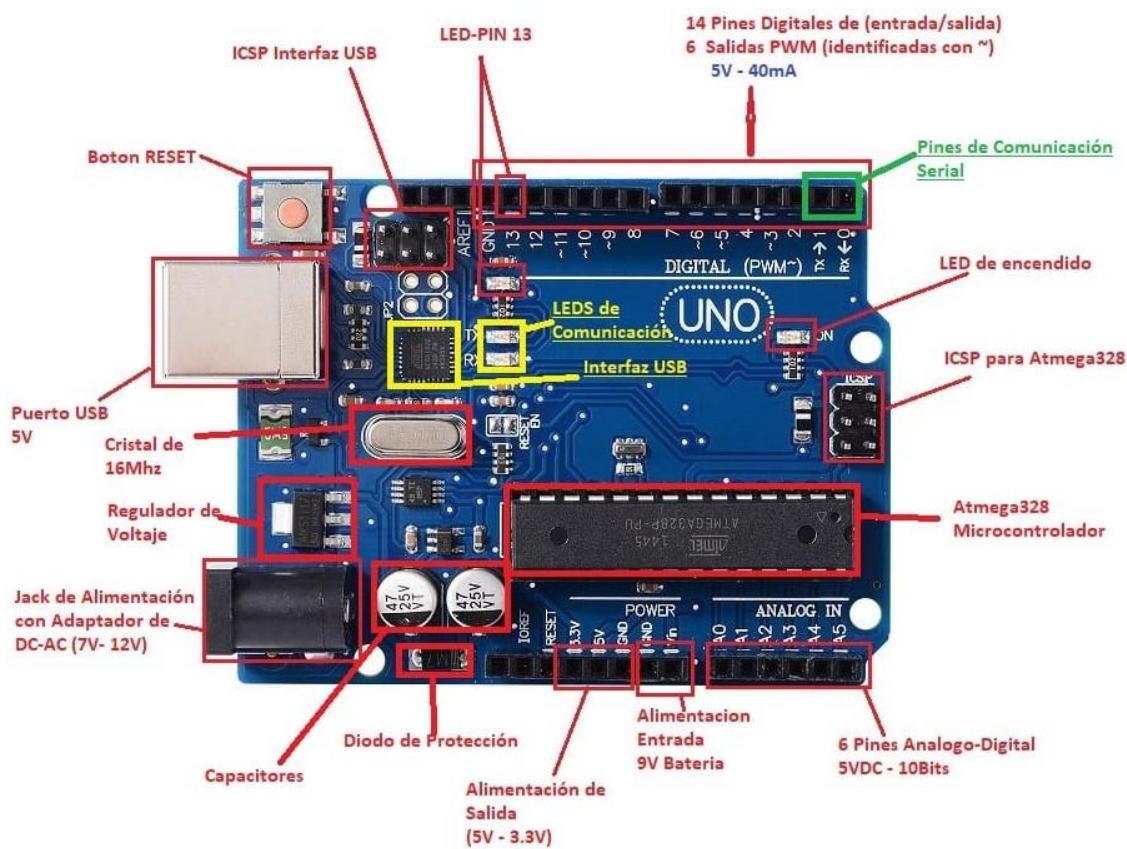


Figura 13. Conexiónado de la placa Arduino UNO.

3.2.4 DFRobot Quad DC Motor Driver Shield.

Como se ha comentado en el apartado anterior, existen diferentes placas diseñadas para implementar diversas funcionalidades en los microcontroladores de Arduino.

Para la elaboración de este proyecto, se ha hecho uso de la placa Quad DC Motor Driver Shield de la marca DFRobot (Figura 14), que se conecta directamente sobre el Arduino UNO mediante el acoplamiento de sus pines sin necesidad de alguna otra conexión externa. Esta placa incorpora 4 canales para motores DC con control de dirección y velocidad de 8 bits. Utiliza un potente driver de potencia TB6612FNG de 1.2A por canal con una caída de tensión baja, lo cual es importante si se va a realizar uso de baterías para alimentar la placa. Además, incluye un chip generador de PWM propio, con lo que libera al Arduino de esta tarea y todo el conjunto se controla mediante el bus I2C.

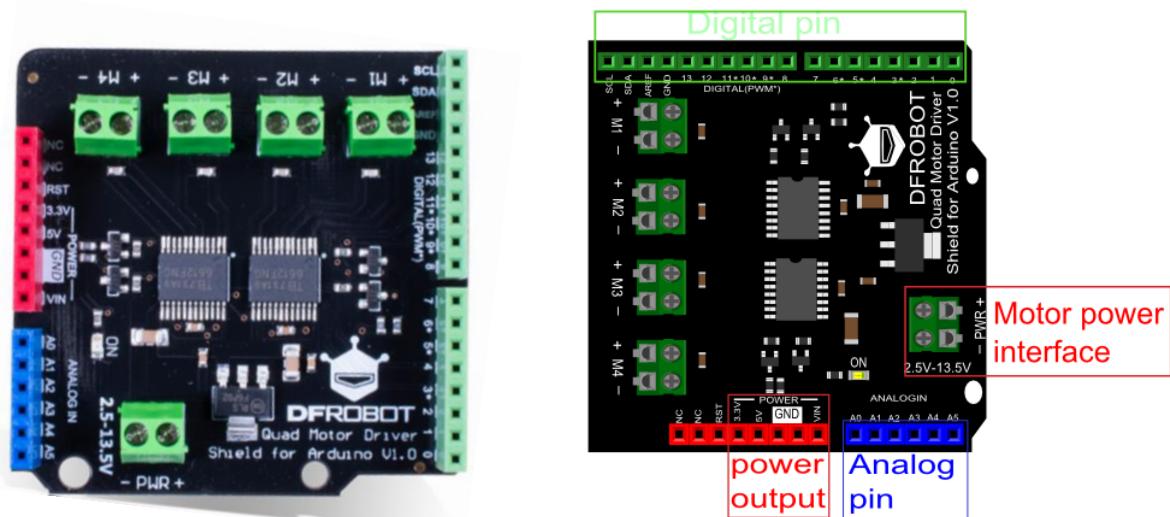


Figura 14. Placa DFRobot Quad DC Motor Driver Shield para Arduino UNO.

Para la alimentación de ambos sistemas se ha utilizado una fuente de alimentación de 9V que se conecta directamente a la placa.

3.3 Herramientas Software.

3.3.1 SolidWorks.

La herramienta utilizada para diseñar el sistema de acoplamiento ha sido SolidWorks, un software de diseño CAD 3D para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos 2D.

Este software permite al usuario realizar el diseño de piezas a través de una serie de operaciones que se almacenan en un historial de forma que, en caso de error, se puede modificar la operación deseada sin tener que rectificar el diseño. Por lo tanto, el usuario puede editar fácilmente el diseño en cualquier etapa del proceso. También permite exportar los diseños realizados en el formato adecuado (.stl) para su posterior impresión 3D.

3.3.2 Arduino IDE.

Para poder realizar el control de los motores es necesario implementar en el software libre de Arduino el código que ejecute dicha funcionalidad.

Arduino ofrece la plataforma Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado), que es un entorno de programación con el que cualquiera puede crear aplicaciones para las placas Arduino. La estructura básica de programación de Arduino es bastante simple y divide la ejecución en dos partes: setup y loop. Setup() constituye la preparación del programa y loop() es la ejecución. En la función Setup() se incluye la declaración de variables y se trata de la primera función que se ejecuta en el programa. Esta función se ejecuta una única vez y es empleada para configurar el pinMode e inicializar la comunicación serie. La función loop() incluye el código a ser ejecutado continuamente (leyendo las entradas de la placa, salidas, etc.).

3.3.3 MatLab.

Debido a la necesidad de obtener un interfaz gráfico, que permita al usuario poder manejar los grados de libertad del instrumento de forma teleoperada, se ha recurrido al uso de la plataforma de programación MatLab.

MatLab es una herramienta que permite combinar muchas disciplinas de una manera muy sencilla a través de un lenguaje de programación orientado a matrices.

Mediante la aplicación de diseño se puede crear un interfaz gráfico con una serie de botones que se comuniquen con el Sistema Operativo Robótico (ROS). Mediante la extensión Robotics Toolbox.

3.3.4 ROS.

Con el fin de poder conectar los comandos que se introducen desde el interfaz gráfico (MatLab) con el programa que coordina el sentido y velocidad de giro de los motores (Arduino), se ha recurrido al Sistema Operativo Robótico (ROS).

ROS es una herramienta que permite el control de robots mediante un “meta-sistema operativo” de código abierto que posibilita el diseño y la implementación de programas/aplicaciones robóticas con la capacidad de comunicación entre ellas dentro de una misma red, utilizando un lenguaje de programación basado en C++.

La estructura de ROS se puede dividir en varias partes:

- **Nodos.** Un nodo es un archivo ejecutable que tiene la capacidad de comunicación con otros nodos dentro de un mismo paquete. Cada nodo debe tener una función determinada. La comunicación entre nodos se realiza mediante el envío y la recepción de información por medio de temas (topic), servicios, acciones o parámetros.

- **Servicios.** Los servicios constituyen otra forma de comunicación entre nodos. En la comunicación mediante servicios un nodo actúa como servidor (único) y los demás como clientes. Los nodos clientes realizan peticiones que debe atender el nodo servidor. La información de los servicios consta por tanto de los argumentos de petición y de la respuesta.
- **Topics.** Los topics constituyen el sistema de transporte a través del cual se intercambian mensajes entre nodos. Un nodo puede publicar y estar suscrito a varios topics.
- **ROS Master.** ROS Master proporciona servicios de nombramiento y registro al resto de nodos del sistema ROS. Por otro lado, realiza un seguimiento de los editores y suscriptores de los topics, así como de los servicios. El papel del Master es permitir que los nodos ROS individuales se localicen entre sí. Una vez que estos nodos se han localizado entre sí, se comunican entre ellos en modo *peer-to-peer*.
- **Roscore.** Es la instrucción que se encarga de establecer la arquitectura maestro-esclavo entre los nodos. Este es un nodo raíz que establece la comunicación con el resto de los nodos. En las nuevas versiones de ROS (ROS 2) se elimina debido a la introducción de una estructura DDS que establece una arquitectura distribuida. Esta instrucción pone en marcha:
 - ROS Master.
 - Un servidor de parámetros.
 - El nodo *rosout* que consiste en un mecanismo de registro de informes de ROS.

3.4 Conclusiones

Una vez conocido los dispositivos que van a dar lugar a la solución final y sus características principales, se puede avanzar a la siguiente fase de diseño del proyecto. Así mismo, tras haber realizado una breve presentación de aquellas herramientas software que van a permitir el modelaje de las piezas, el control de los movimientos y la comunicación entre las mismas, se pasará a la siguiente fase de diseño tanto del sistema de acoplamiento como del mecanismo de control.

4 Diseño del mecanismo de acople.

4.1 Introducción.

Concluido el análisis de la geometría y la disposición de los mecanismos de actuación del instrumento *EndoWrist*, se procede a realizar una explicación del diseño del mecanismo de acople entre el brazo manipulador UR3 y la herramienta EndoWrist.

La solución final se puede dividir en dos partes: un sistema de acople con el instrumento *EndoWrist* y, un sistema de acople con el brazo robótico UR3. El diseño de cada una da las piezas que compone cada sistema se detalla en el Anexo 1 donde se encuentran los planos de cada una de ellas.

4.2 Sistema de acoplamiento con el instrumento *EndoWrist*.

Las articulaciones de la plataforma Da Vinci cuentan con un mecanismo de anclaje de tal forma que los instrumentos *EndoWrist* queden fijados de forma segura en las mismas (Figura 15). Realizando un análisis del mecanismo de anclaje, se aprecia que este cuenta con dos pestañas las cuales se introducen por presión en el instrumento y lo fijan al mismo. A fin de que el personal pueda sustituir el instrumental de forma rápida y sencilla, estos instrumentos cuentan con unos pulsadores (Figura 16) en sus laterales que permiten la liberación de los mismos del mecanismo y por consiguiente del brazo robótico [6].



Figura 15. Acoplamiento del instrumento *EndoWrist* con el sistema Da Vinci.

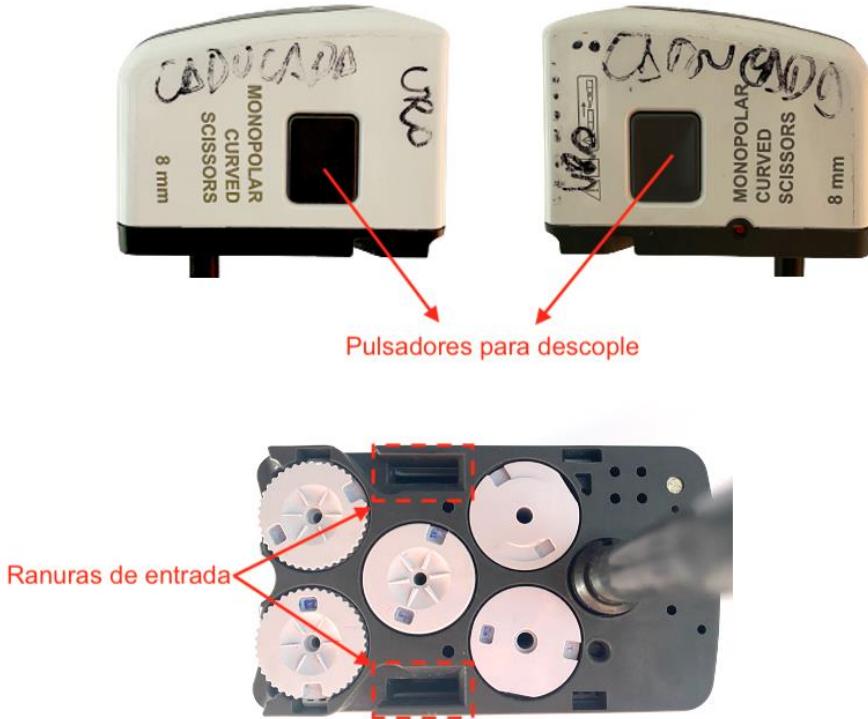


Figura 16. Sistema de acople y desacople del instrumento *EndoWrist*.

Puesto que el instrumento ya posee un sistema de anclaje incorporado, como se ha explicado anteriormente, en este proyecto se ha utilizado el mismo para poder acoplar el instrumento con el mecanismo que acciona los grados de libertad del mismo. Este sistema debe asegurar la unión entre ambos y, permitir su liberación de forma sencilla utilizando los pulsadores laterales de desacople. Los motores deben quedar fijos en el sistema, de forma que solo se permita el giro de su eje durante el movimiento de los grados de libertad del instrumento. Por ello se ha diseñado una solución que permita la introducción de los motores de manera que queden fijados en el sistema de forma concéntrica a los discos de accionamiento de los grados de libertad.

Teniendo en cuenta la geometría y características del instrumento *EndoWrist*, se ha realizado el diseño de la Figura 17. Este prototipo cuenta con cuatro piezas las cuales presentan una funcionalidad esencial en el prototipo final. A continuación, se procederá a analizar cada una de ellas, describiendo su funcionalidad y características más llamativas.

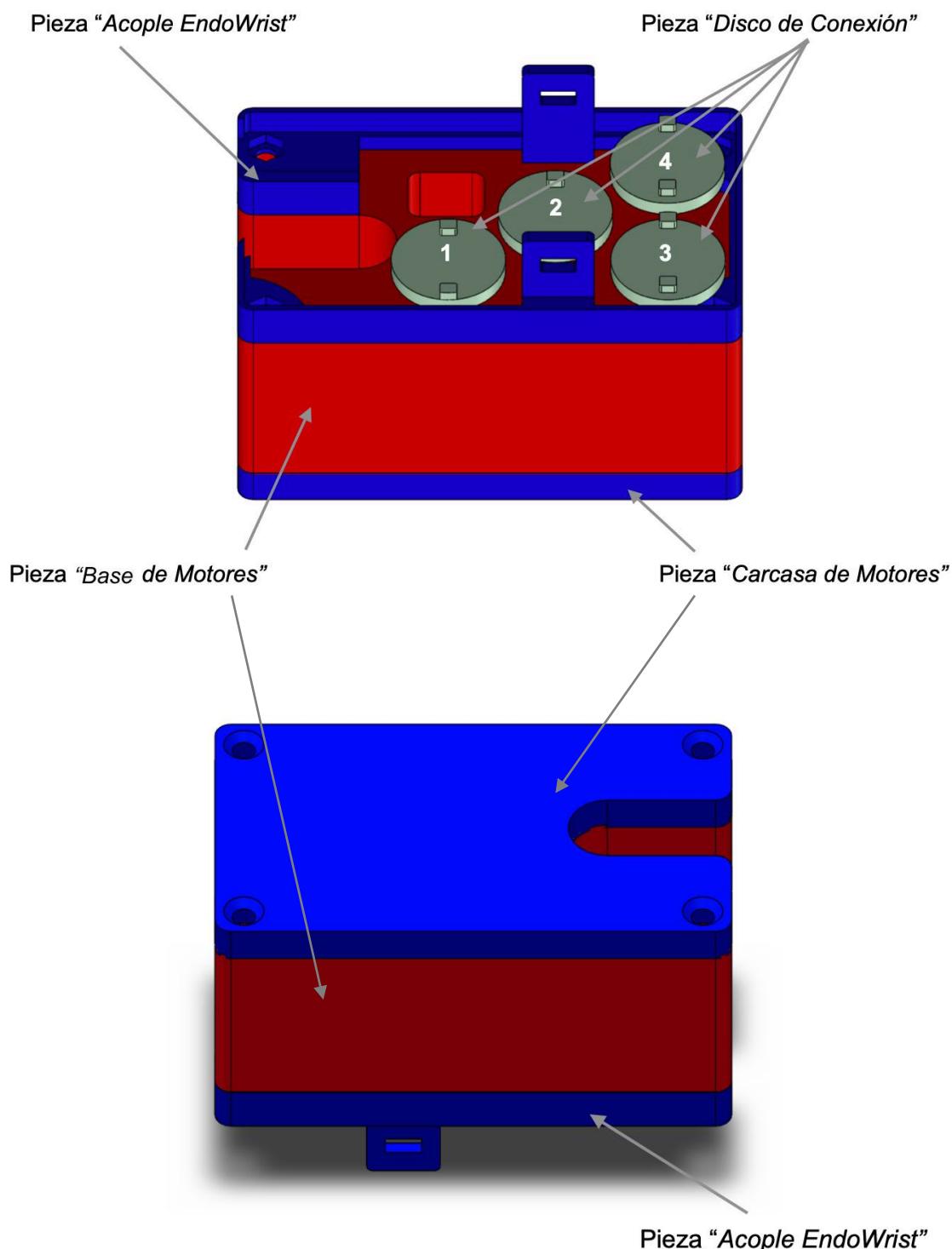


Figura 17. Prototipo final del sistema “Acople EndoWrist” en SolidWorks.

4.2.1 Pieza “Base de Motores”.

En primer lugar, se comienza describiendo la principal pieza de este sistema. Esta pieza (Figuras 18 y 19) es la encargada de almacenar los motores, fijarlos para que no puedan moverse y, por último, es la encargada en ubicar los ejes de los motores de manera que se dispongan concéntricamente con los discos del instrumento que accionan los grados de libertad del mismo. Otra funcionalidad de esta pieza es distribuir y guiar el cableado de cada uno de los motores hasta el controlador, que se encuentra en el exterior del sistema. Esta última exigencia ha supuesto el aprovechamiento de la ubicación del disco que no interviene en el movimiento de los grados de libertad del instrumento, como salida del cableado de alimentación del conjunto de motores. Para facilitar el guiado del cableado, se han realizado una serie de ranuras por las que se guiará el mismo. Finalmente, la pieza cuenta con cuatro taladros de métrica M3 por donde pasan cuatro tornillos de 40 mm de longitud que acoplan todas las piezas del sistema final.

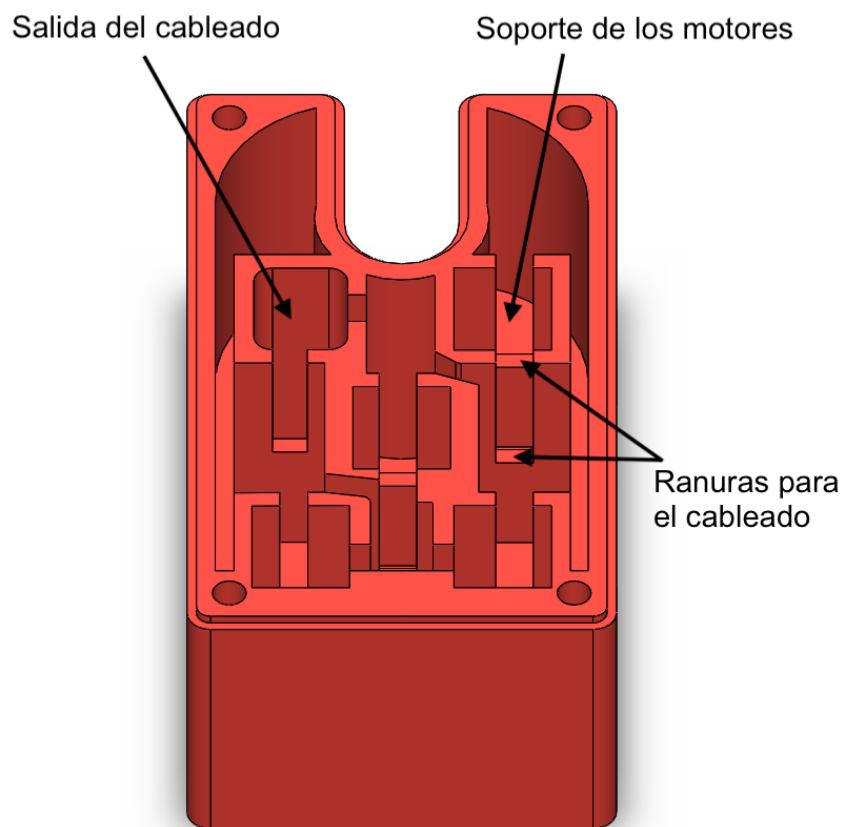


Figura 18. Superficie interna de la pieza “Base de Motores”.

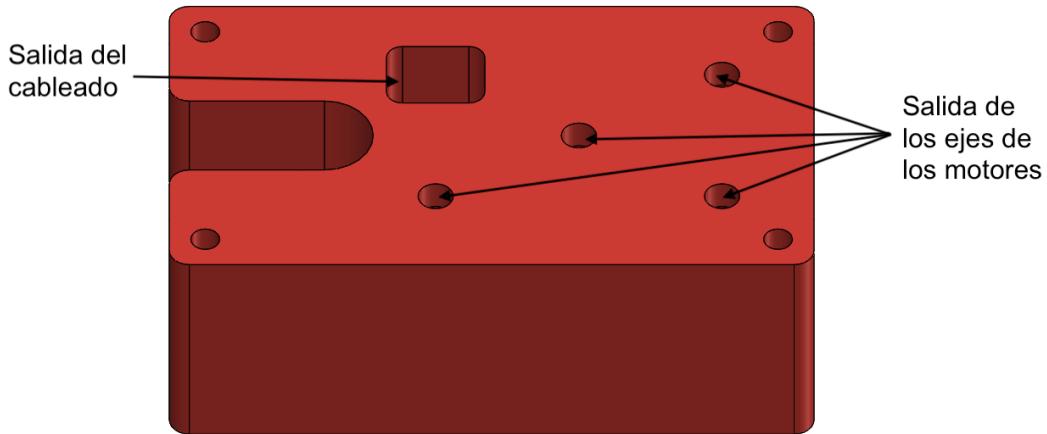


Figura 19. Superficie inferior de la pieza “Base de Motores”.

Antes de imprimir la pieza completa, se han realizado una serie de impresiones de secciones de la pieza para comprobar que, tanto las dimensiones de los soportes para los motores como su ubicación son correctas. Durante la impresión de las secciones se ha comprobado que las medidas realizadas manualmente sobre el instrumento poseían un ligero error, lo cual provocaba que las salidas de los ejes de los motores no coincidieran con los centros de los discos del instrumento de forma exacta. Este error ha sido corregido mediante el ajuste manual de la posición de los centros de los discos del instrumento en el diseño. Por otro lado, también se ha ajustado las dimensiones de los soportes de los motores para que se permita su cómoda introducción y retirada de la pieza, pero que a la vez se asegure su inmovilización durante su actuación.

4.2.2 Pieza “Carcasa de Motores”.

Esta segunda pieza (Figuras 20 y 21) tiene varias funcionalidades dentro del prototipo final. En primer lugar, como su nombre indica, consiste en la carcasa que aísla los motores del entorno, evitando posibles accidentes y situaciones que puedan comprometer la soldadura de los cables y los motores. En segundo lugar, cuenta con cuatro salientes en su parte interior (uno para cada motor) que sirven para presionar a los motores y evitar que estos puedan moverse. Finalmente, esta pieza es el punto por el que se atornilla el sistema una vez se acoplen todas las piezas que lo conforman.

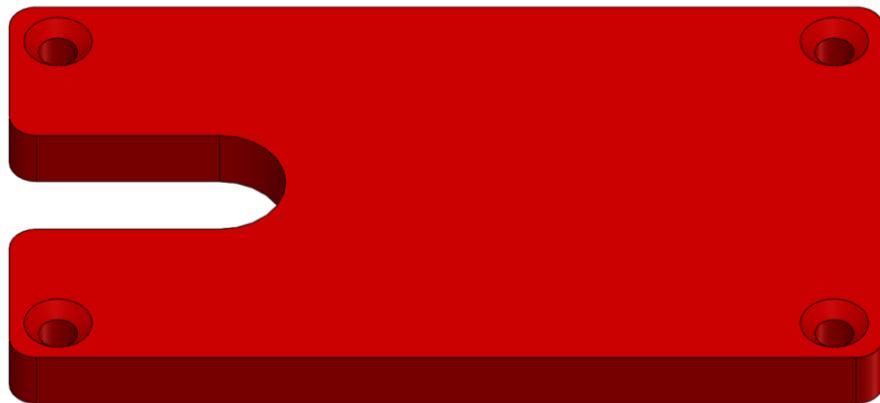


Figura 20. Superficie exterior de la pieza “Carcasa de motores”.

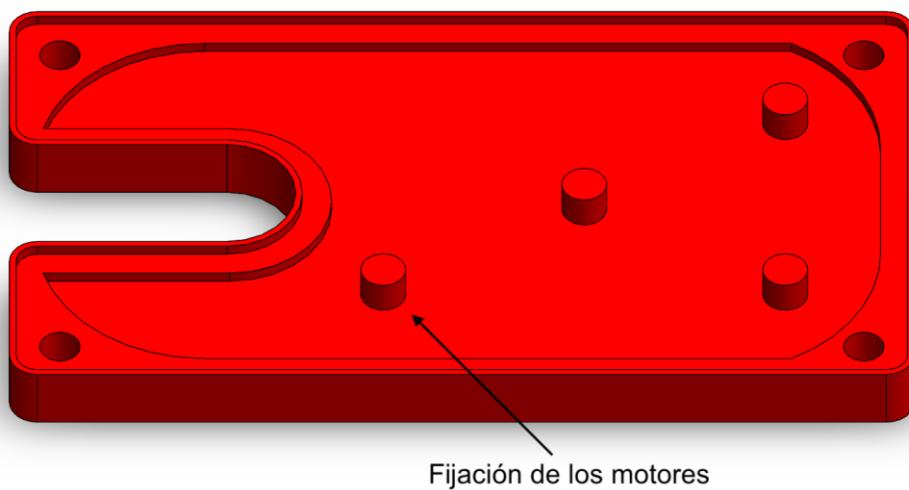


Figura 21. Superficie interior de la pieza “Carcasa de Motores”.

4.2.3 Pieza “Acople EndoWrist”.

Esta pieza es esencial en el diseño ya que, por un lado, sirve para acoplar el sistema al instrumento y, por otro lado, sirve como fijación del sistema (Figura 22). Esta última funcionalidad se debe a que se han establecido cuatro soportes para tuercas de métrica M3 y de esta forma, al unir las piezas anteriores, se pueda fijar de forma segura con cuatro tornillos de la misma métrica y de 40 mm de longitud que se introducen por la pieza anteriormente descrita.

Como se ha mencionado al principio del apartado, se ha tratado de imitar el sistema de anclaje del instrumento. Sin embargo, al no tener acceso a la plataforma Da Vinci, donde se encuentran las pestañas que anclan el instrumento, no se han podido tomar las medidas de forma directa. Por ello para poder obtener dichas medidas, que permiten el anclaje del sistema al instrumento, se ha realizado la impresión de diferentes piezas de prueba hasta dar con las medidas exactas que permitan asegurar el acople y desacople de la pieza fácilmente.

Por ultimo, se ha realizado una ranura que permite conducir el cableado hacia el exterior del instrumento. El motivo de esta característica ha sido evitar situaciones de interferencia del cableado con los ejes de los motores.

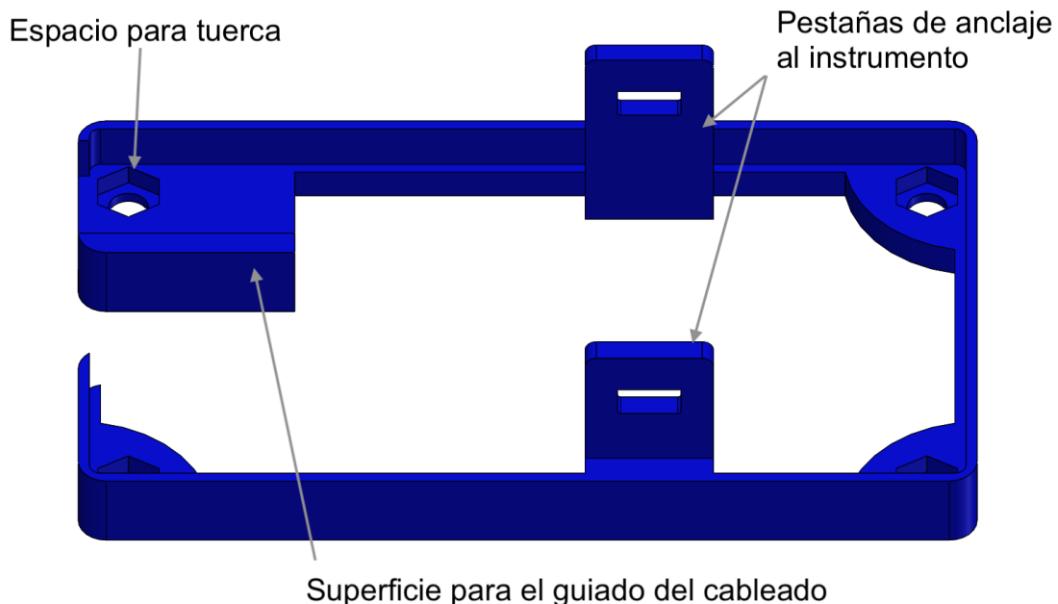


Figura 22. Superficie exterior de la pieza “*Acople EndoWrist*”.

4.2.4 Pieza “Discos de Conexión”.

Finalmente, la necesidad de transmitir el movimiento de los ejes de los motores a los discos del instrumento, para poder accionar los grados de libertad del mismo, ha requerido del diseño de esta pieza (Figuras 23 y 24). En primer lugar, se ha realizado en el centro de esta pieza un hueco que posee la misma geometría que el eje del motor, donde se alojará el mismo y permitirá el giro de

ambos simultáneamente. Seguidamente, para poder transmitir el giro de los discos de conexión a los discos del instrumento, se ha observado que estos últimos cuentan con dos muescas las cuales se han utilizadas como elemento de acoplamiento entre ambos discos.

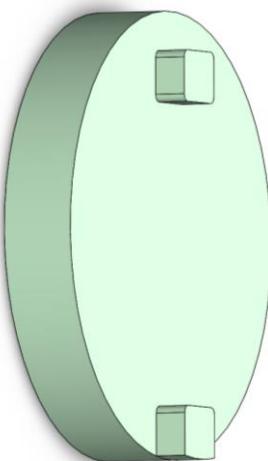


Figura 23. Superficie exterior de la pieza “Disco de Conexión”.

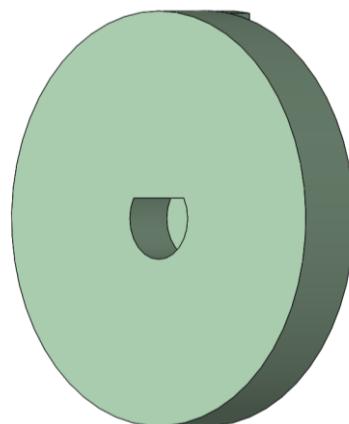


Figura 24. Superficie interior de la pieza “Disco de Conexión”.

4.3 Sistema de acoplamiento al brazo robótico UR3.

La finalidad de este proyecto es poder incorporar en el efecto final del brazo robótico UR3 el instrumento junto con el mecanismo de control. Por ello es necesario desarrollar este sistema permitiendo acoplar el conjunto anterior con el brazo robótico. Este acoplamiento debe ser lo más seguro posible, evitando movimientos del instrumento, ya que estos supondrían una pérdida de la precisión y exactitud de la trayectoria realizada.

El sistema está compuesto por dos piezas. La primera pieza (Figura 25) cuenta con cuatro orificios para tornillos de métrica M6 con los cuales se fijaría al efecto final del brazo robótico UR3. Los tornillos que se utilizan deben tener una longitud de 15 mm. Además, en la parte inferior de la pieza, se encuentran encajadas seis tuercas de métrica M3 que servirán como unión de las dos piezas. La segunda pieza (Figura 26), que posee la geometría inversa de la primera, sirve de abrazadera del instrumento mediante la introducción de seis tornillos de métrica M3 y de 42 mm de longitud que se atornillarán a las tuercas anteriormente mencionadas.

A este sistema de acoplamiento se le ha añadido a la parte frontal (Figura 26 a) una serie de conectores (Figura 27) en paralelo para evitar posibles tirones de los cables y que estos produzcan daños en los motores. Estos conectores unen los cables que alimentan a los motores a los cables que controlan la velocidad y sentido de giro de los mismos a través del microcontrolador. Esta unión se realiza mediante presión por palanca y de esta forma las tracciones que se produzcan nos las sufrirá el cableado interno de los motores.

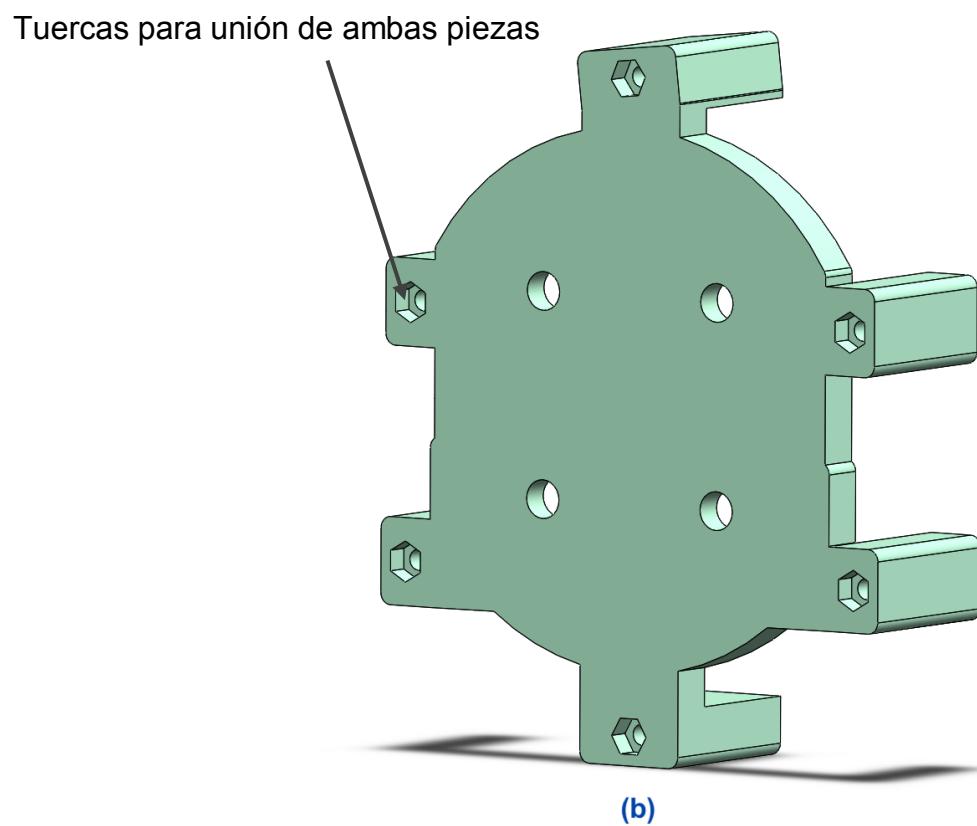
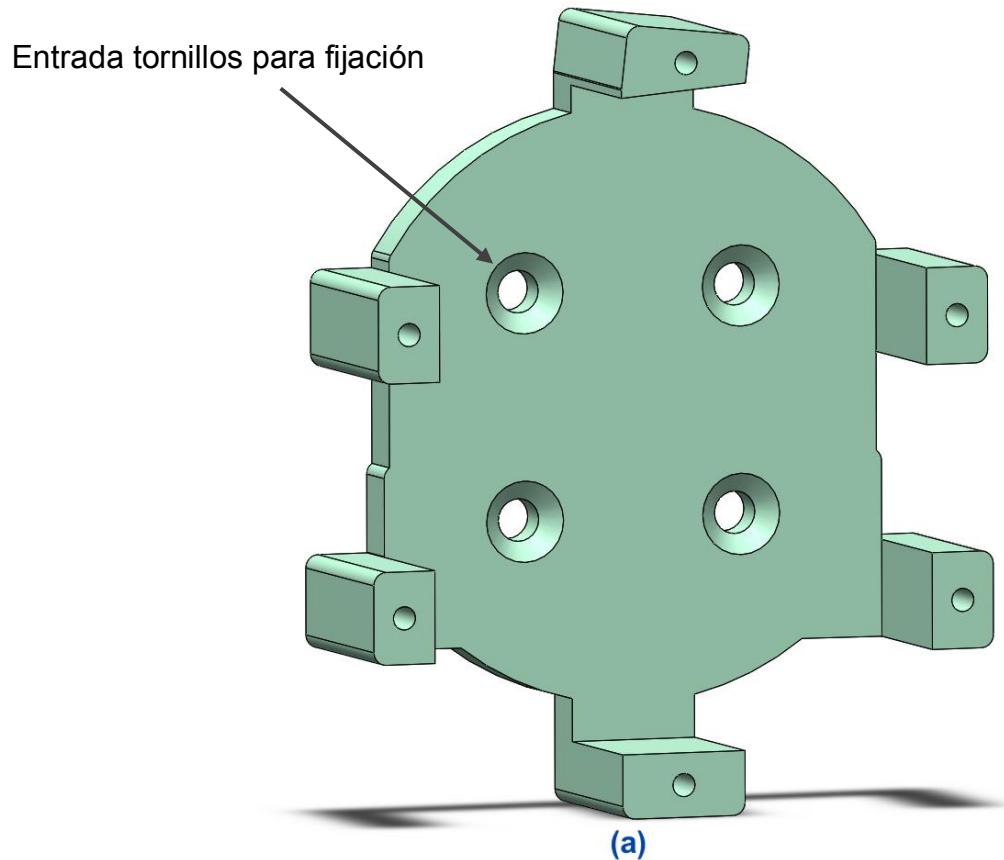


Figura 25. Pieza “Acople 1 EndoWrist y UR3”: parte frontal (a) y trasera (b).

Entrada tornillos para unión

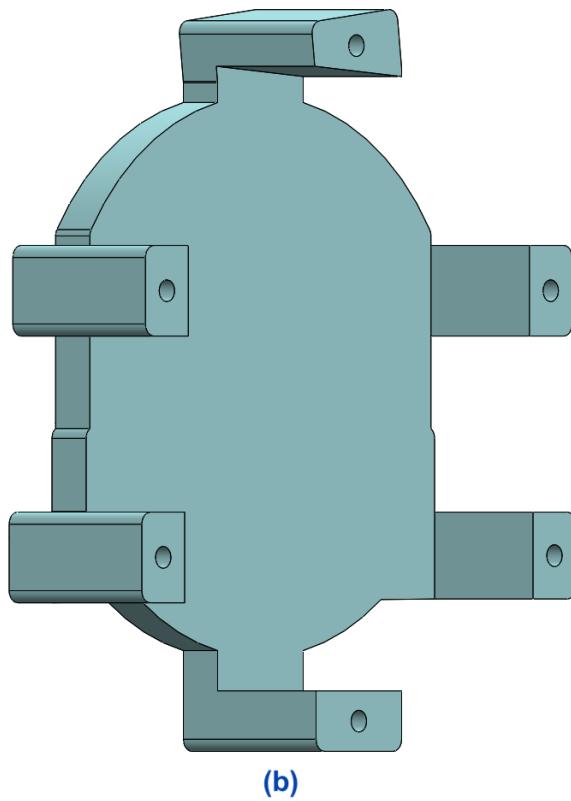
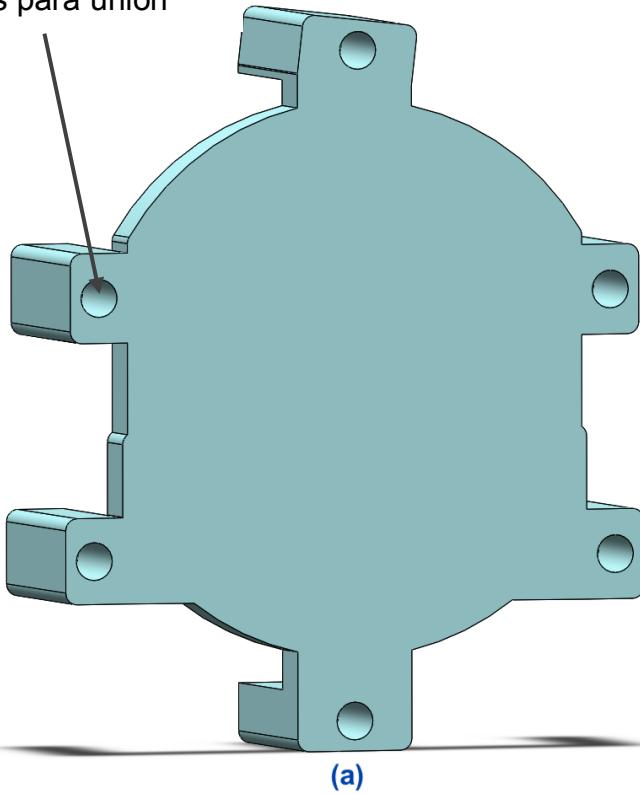


Figura 26. Pieza “Acople 2 EndoWrist y UR3”: parte frontal (a) y trasera (b).



Figura 27. Conectores de cables.

4.4 Prototipo funcional.

Tras haber presentado los sistemas que componen la solución final, de las piezas que componen cada uno de estos sistemas y de la importancia de las mismas, se procede a realizar una descripción del prototipo funcional donde se verifique la correcta solución diseñada. Para ello se detallará el montaje de la misma junto con el instrumento y con el brazo robótico UR3.

En primer lugar, una vez soldados los cables de alimentación, se insertan los motores en la pieza *Base de Motores* y se guían los cables hasta la apertura de salida a través de las ranuras (Figura 28).



Figura 28. Base de Motores.

El siguiente paso consiste en la colocación de la carcasa elaborada, de forma que los motores queden fijados. También es necesario introducir los tornillos que fijarán el sistema completo (Figura 29).



Figura 29. Base + Carcasa de Motores.

Posteriormente, se coloca la pieza *Acople EndoWrist* junto con cada una de las tuercas en su ubicación, de forma que, al atornillar los tornillos introducidos anteriormente, el sistema quede fijado (Figura 30).

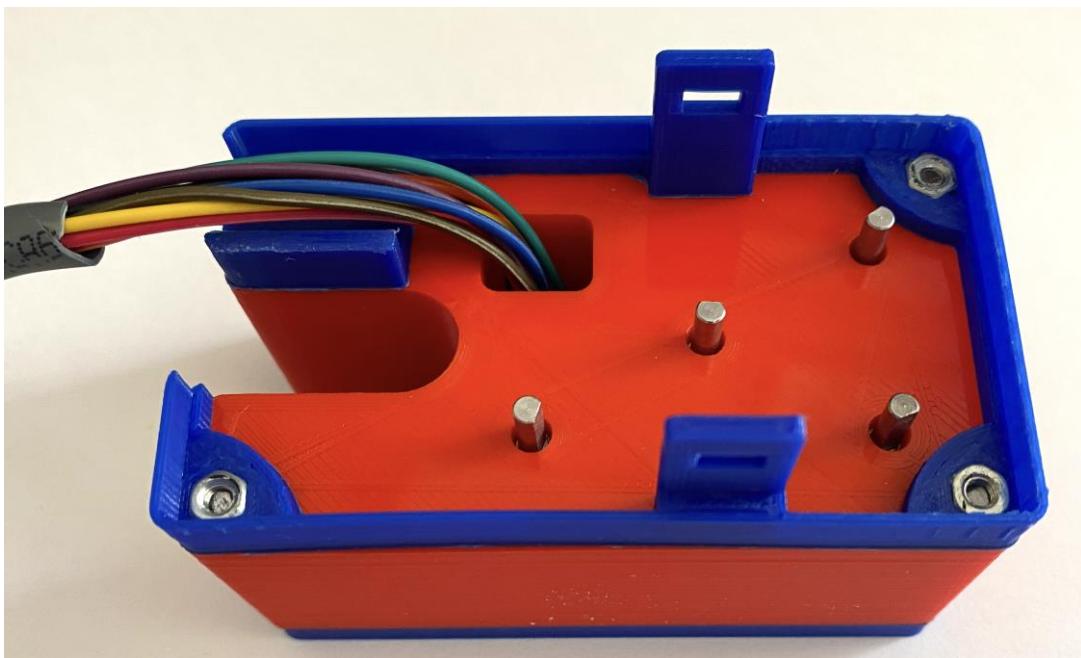


Figura 30. Base + Carcasa de Motores + Acople EndoWrist.

Una vez montado y fijado el sistema, se colocan los los cuatro *Discos de Conexión* sobre los ejes de los motores (Figura 31).



Figura 31. Base + Carcasa de Motores + Acople EndoWrist + Discos de conexión.

Finalmente, para poder insertar el mecanismo con el instrumento, es necesario variar la orientación de cada disco de conexión de manera manual para que coincida con la de los discos del instrumento. Una vez realizado, se procede a anclar el sistema con el instrumento (Figura 32) y en caso de que no quede anclado del todo, variando la orientación de la punta de la herramienta, se produce el anclaje total.



Figura 32. Sistema de acoplamiento al instrumento EndoWrist completo.

Una vez realizado en montaje del instrumento con el mecanismo de control, se procede al anclaje del conjunto con el efecto final del brazo robótico UR3. En primer lugar, se atornilla al efecto final la pieza “*Acople 1 EndoWrist UR3*” mediante cuatro tornillos (Figura 33).

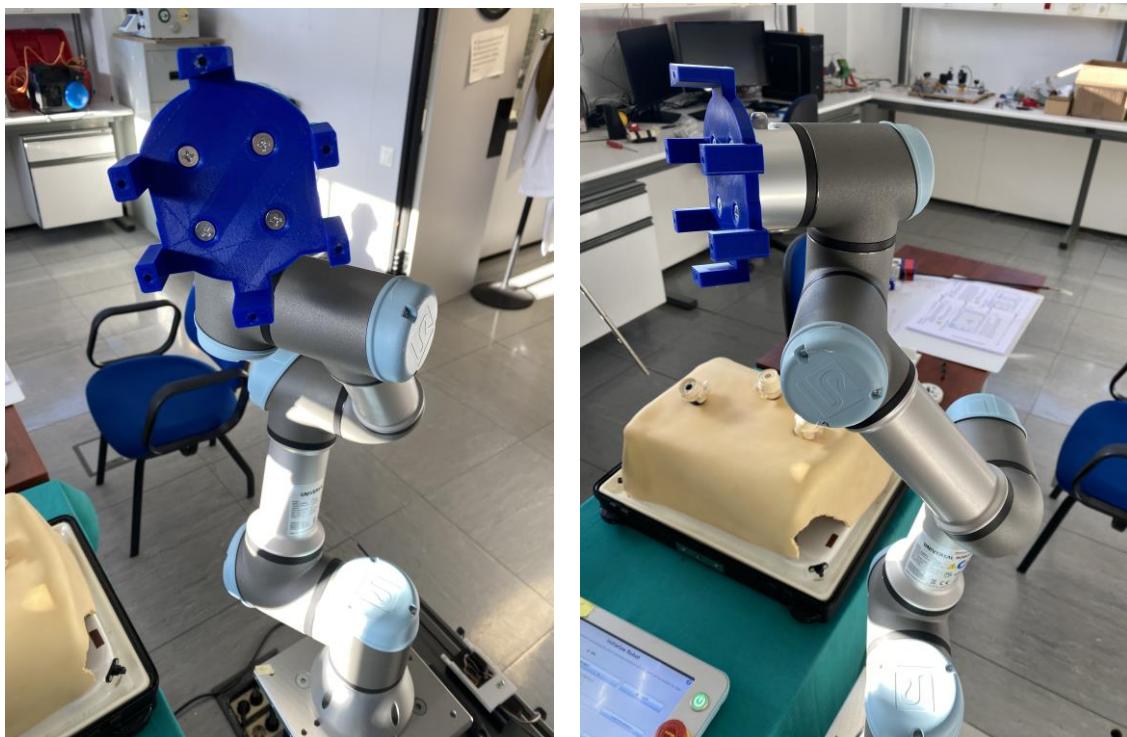


Figura 33. Fijación de la pieza *Acople 1 EndoWrist UR3* con el brazo robótico

Posteriormente, una vez sujetada esta última pieza con el efecto final, se coloca el conjunto instrumento-mecanismo y, seguidamente, se instala la última pieza, “*Acople 2 EndoWrist UR3*”, atornillándola a la pieza “*Acople 1 EndoWrist UR3*”. Para concluir, se procede a distribuir el cableado de cada motor en los conectores instalados en la pieza “*Acople 2 EndoWrist UR3*” y, de esta forma, se habría completado la correcta instalación del sistema en el brazo robótico e instrumento *EndoWrist* (Figuras 34 y 35).



Figura 34. Sistema de acoplamiento de un instrumento EndoWrist para un brazo robótico UR3 (I).



Figura 35. Sistema de acoplamiento de un instrumento EndoWrist para un brazo robótico UR3 (II).

4.5 Conclusiones

Como se puede observar en las Figuras 34 y 35, la solución final que se ha diseñado es óptima y permite al brazo robótico UR3 trabajar con el dispositivo *EndoWrist* colocado en su efecto final. Para lograr esta solución, se ha requerido el diseño de diferentes piezas que se detallan en el capítulo, atendiendo a las características y condiciones del instrumento. Una vez obtenidos los diseños finales, se ha llevado a cabo la impresión de cada una. En diversos casos, ha sido necesario realizar un reajuste de alguna de las piezas a causa de no haberse obtenido el resultado esperado con la impresión 3D.

5 Arquitectura Software.

5.1 Introducción.

El siguiente paso a realizar una vez obtenido un mecanismo que permita el almacenaje de los motores y el acople al instrumento *EndoWrist* y al brazo robótico UR3, consiste en la elaboración de un control de los motores para poder efectuar el movimiento de la punta del instrumento. En este capítulo se aborda el problema de control mencionado mediante la utilización de diversos programas que permitan comunicar un panel de control con los motores del sistema que accionan los movimientos permitidos. Los códigos de los programas realizados se pueden encontrar en el repositorio de GitHub del proyecto¹.

5.2 Sistema de control del instrumento *EndoWrist*.

Para realizar un sistema que controle los grados de libertad del instrumento, se ha realizado un estudio de los giros que deben realizar los motores en cada uno de los discos del instrumento, para accionar cada uno de los movimientos permitidos (roll, pitch, yaw y abrir y cerrar el efecto final del instrumento). Este estudio se ha realizado en el punto 3 del capítulo 2 de este proyecto.

Antes de elaborar un programa que se comunique con ROS y el panel de control, se ha realizado un programa en Arduino IDE. Este programa se ha desarrollado con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de los motores. Para ello se ha realizado un programa que reciba por teclado caracteres, este compara el carácter recibido con otros asignados a cada tipo de movimiento, en caso de coincidencia se produce el giro de los motores involucrados en el mismo.

Una vez comprobado y verificado el correcto funcionamiento de los motores, se ha pasado a crear un sistema de control más sofisticado. En primer lugar, se ha diseñado un panel de control (Figura 36) mediante MatLab que permita enviar comandos a ROS según los botones pulsados en el mismo. Este

¹ https://github.com/SurgicalRoboticsUMA/TFG_Hugo

panel cuenta con una ilustración de la punta del instrumento y las posiciones de los ejes con respecto a cada movimiento, de forma que se le permita al usuario conocer el giro y sentido del movimiento solicitado, a través de los botones del panel. Para ello se utiliza una función de *callback* por cada uno de los botones presentes en el panel. Estas funciones publicarán a través de un topic (*/cmd_EndoWrist*) en ROS un carácter en función del movimiento que se haya pulsado. Este panel cuenta con dos botones por cada uno de los movimientos, uno para aumentar y otro para disminuir el giro. Por otro lado, posee un botón para iniciar y otro para finalizar la comunicación con ROS, de esta forma, hasta que no se pulse el botón de encendido, no se podrán mandar comandos al instrumento. Finalmente, se ha incluido un interruptor para abrir y cerrar el efecto final, que en este caso son unas tijeras monopolares curvas.

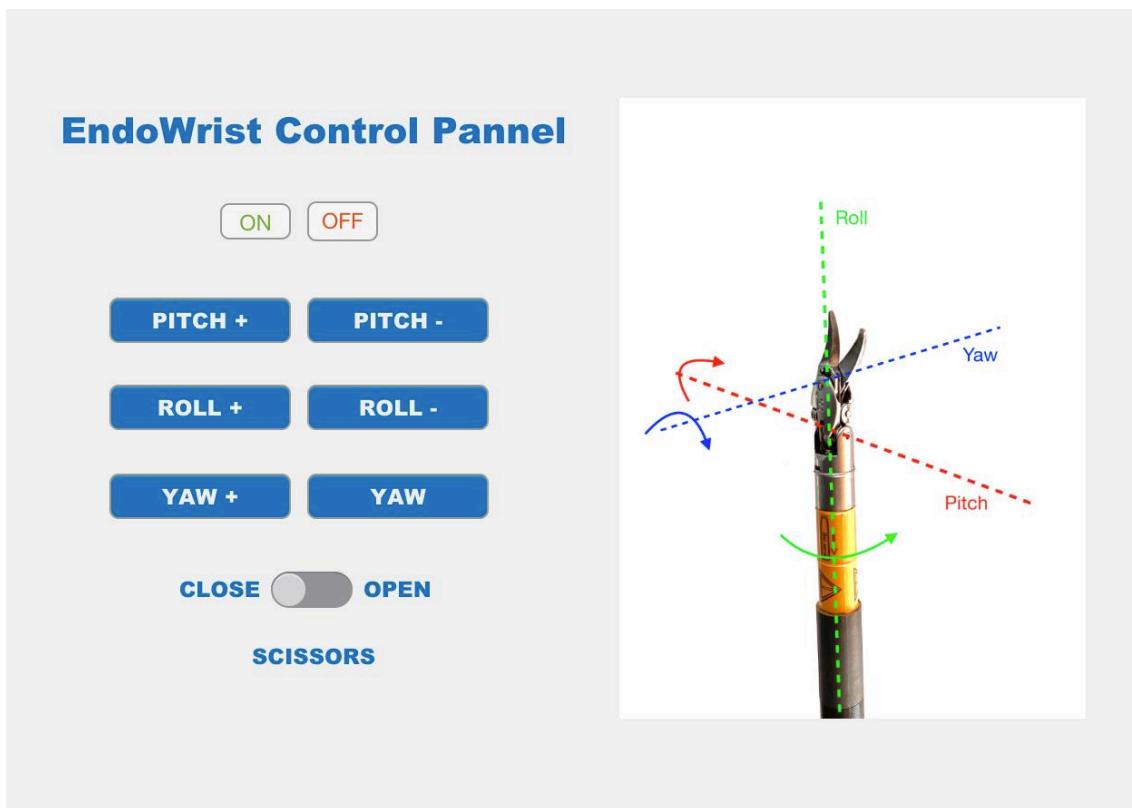


Figura 36. Panel de control del instrumento

En cuanto a la programación en Arduino, se ha sustituido el primer código generado por un programa que cree un nodo de ROS. Este nodo realiza una suscripción al topic */cmd_EndoWrist*. Desde este topic se reciben los caracteres enviados desde el panel de control, estos caracteres representan un tipo de movimiento, el cual acciona una serie de motores con una velocidad y giro

determinados. Para lograrlo, se ha implementado una función de *callback* que compara el carácter recibido del panel con los caracteres establecidos que representan cada uno de los movimientos. En caso de que se produzca la coincidencia, se realizará el accionamiento de los motores especificados en dicho movimiento, al igual que en el primer programa desarrollado.

Para el ajuste del giro de los motores se han realizado diferentes pruebas experimentales hasta llegar a la velocidad y tiempo de giro idóneos para cada uno de los movimientos, de forma que los motores puedan realizar el giro de cada uno de los discos de conexión del instrumento. En la Tabla 1 se pueden ver representados las velocidades (PWM) y tiempos (Time) de actuación de cada motor en función del movimiento que se realice. El signo de la velocidad representa el sentido de giro del motor. Estas pruebas se han llevado a cabo debido a la existencia de movimientos que requieren mayor ángulo de giro de un motor y menor ángulo de giro de otros. Sin embargo, tanto la velocidad como el ángulo de giro se pueden modificar variando el tiempo y la velocidad de giro de cada motor.

		Motor 1		Motor 2		Motor 3		Motor 4	
		PWM	Time	PWM	Time	PWM	Time	PWM	Time
Roll	+	+100	50 ms	0	0 ms	0	0 ms	0	0 ms
	-	-100	50 ms	0	0 ms	0	0 ms	0	0 ms
Pitch	+	0	0 ms	-150	50 ms	-70	50 ms	+70	50 ms
	-	0	0 ms	+150	50 ms	+70	50 ms	-70	50 ms
Yaw	+	0	0 ms	0	0 ms	-180	60 ms	+180	60 ms
	-	0	0 ms	0	0 ms	+180	60 ms	-180	60 ms
Scissors	open	0	0 ms	0	0 ms	-170	70 ms	-170	70 ms
	close	0	0 ms	0	0 ms	+170	70 ms	+170	70 ms

Tabla 1. Velocidad y tiempo de giro de los motores en función del movimiento.

5.3 Arquitectura ROS.

Como se ha descrito, el software implementado para el control de los movimientos se realiza mediante la comunicación con ROS. En primer lugar, el nodo elaborado en MatLab, encargado de generar un panel gráfico y publicar mensajes a través del topic `/cmd_EndoWrist`, debe registrarse en el ROS Master como publicador. En segundo lugar, el nodo de control de motores, desarrollado en Arduino IDE, debe registrarse como subscriptor al topic `/cmd_EndoWrist` en el ROS Master.

Una vez registrados ambos nodos en ROS Master se establece la comunicación *peer-to-peer* de forma que se realice el intercambio de mensajes entre ambos de forma directa. Los mensajes enviados por el topic se corresponden con los caracteres transmitidos desde el panel de control que ejecutan el movimiento comandado en el instrumento. En la Figura 37 se puede observar el esquema de la arquitectura realizada en ROS.

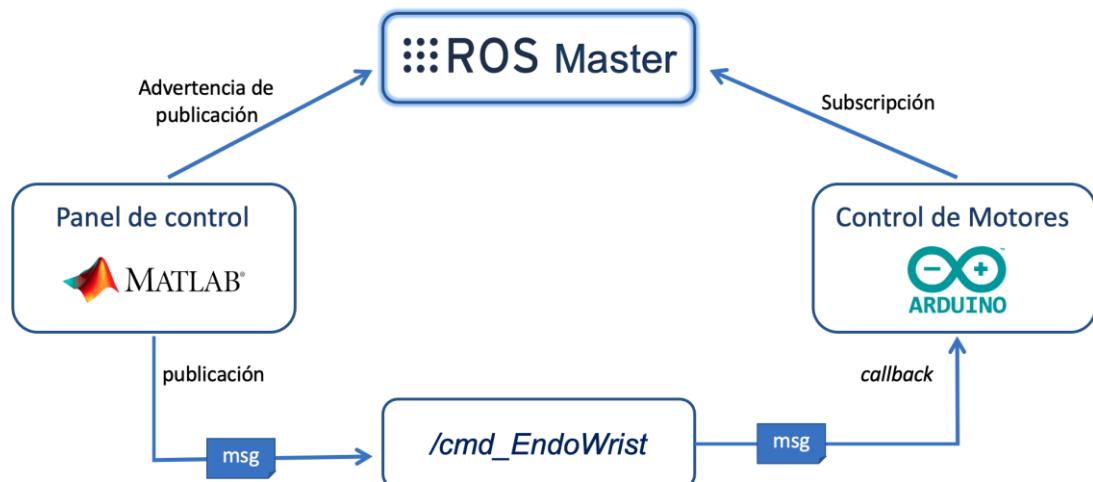


Figura 37. Arquitectura ROS.

5.4 Conclusiones.

La comunicación de diversas aplicaciones software ha permitido alcanzar un sistema de control que permite efectuar diferentes movimientos con el instrumento. En este capítulo se ha podido examinar dos sistemas de control, un primer sistema que utiliza únicamente el envío de caracteres desde teclado y, un

segundo sistema, el cual se compone de un panel de control elaborado en MatLab que se comunica con el Sistema Operativo Robótico, ROS. Mediante este último, se reciben caracteres que se envían al controlador, el cual posee el programa que ejecuta el giro de los motores en función del mensaje recibido.

6 Conclusiones y futuras líneas de trabajo.

6.1 Conclusiones.

Una vez finalizadas todas las fases en las que se dividía este proyecto, se puede verificar que, mediante la solución diseñada, se ha logrado obtener un mecanismo de acoplamiento y control de un instrumento quirúrgico *EndoWrist* a un brazo robótico UR3, el cual ofrece unos resultados satisfactorios. A lo largo de la memoria del proyecto se han ido exponiendo todas las necesidades e inconvenientes que han surgido durante el desarrollo, hasta lograr obtener una solución valida que cumpla con los objetivos especificados.

La complejidad tanto del sistema Da Vinci como del instrumento quirúrgico *EndoWrist* ha supuesto la necesidad de llevar a cabo un estudio individual de ambos. En primer lugar, se ha obtenido una pequeña aproximación del funcionamiento del sistema, de los componentes que lo conforman y de las características que lo hacen líder en el sector. En segundo lugar, se ha hecho un estudio más profundo del instrumento *EndoWrist*, donde por un lado, se han estudiado sus características mecánicas de cara al diseño del sistema acoplamiento y, por otro lado, se ha estudiado la cinemática del mismo de cara al control del mismo.

El sistema de acoplamiento diseñado y obtenido mediante impresión 3D permite, por un lado, controlar los grados de libertad del instrumento *EndoWrist* y, por otro lado, acoplar el conjunto al brazo robótico UR3. Como se ha podido observar, la solución se ha dividido en dos sistemas: un sistema de acoplamiento al instrumento, el cual incorpora los motores que actúan sobre los grados de libertad del mismo y, un sistema de acoplamiento del conjunto al brazo robótico. Mediante la modificación del último sistema, se permite la utilización del mecanismo de control del instrumento en cualquier brazo robótico.

En cuanto al sistema de control realizado, se permite teleoperar con el instrumento a través de un panel de control, pudiendo variar los grados de libertad del mismo. Sin embargo, este mecanismo se puede adaptar para ser

utilizado en otros programas sin necesidad de utilizar el panel de control. Esto último es posible gracias a la elección del Sistema Operativo Robótico, ROS.

Este proyecto permite al equipo de Investigación de Robótica Médica de la Universidad de Málaga incluir este tipo de instrumentos en sus investigaciones, aportándoles la capacidad de realizar movimientos más complejos en las investigaciones quirúrgicas que realizan, así como incluir una amplia gama de instrumental quirúrgico.

6.2 Futuras líneas de trabajo.

Una vez obtenida la solución final y comprobado el correcto funcionamiento de la misma, se plantean diversas líneas futuras de trabajo de cara a poder continuar realizando mejoras en el sistema.

En primer lugar, se ha observado que la reductora de los motores produce el par mínimo para poder efectuar el giro de los discos del instrumento. Esto conlleva que los movimientos realizados sean menos precisos y que, para su ejecución, se deben realizar a una velocidad de giro alta lo cual no es muy apropiado en este tipo de situaciones. Se plantea sustituir esta reductora por alguna que produzca mayor par a pesar de que conlleve una disminución de la velocidad. En estos casos, la velocidad requerida no es muy alta, lo cual no supone ningún inconveniente.

En segundo lugar, un aspecto muy importante en el control es la realimentación. El sistema implementado no posee ninguna realimentación que permita corregir el error de posición del instrumento. Por ello, se plantea la introducción de algún sensor de posición como el encoder óptico. Este tipo de sensor posee una gran resolución y permite conocer la posición angular del eje del motor con una gran precisión.

Finalmente, la pieza diseñada para transmitir el giro del eje del motor al disco del instrumento ha sido realizada mediante impresión 3D. El tipo de material que utilizan estas impresoras no es óptimo para este clase de piezas ya que van a sufrir grandes esfuerzos, las cuales han llegado a dejar inservibles alguna de ellas. Por ello, se plantea la sustitución del plástico por algún tipo de

metal que aporte mayor resistencia a la pieza. Esto conllevaría la sustitución de la impresión 3D por el mecanizado de la pieza.

Bibliografía.

- [1] Pereira Fraga, J. G. (2017). Actualidad de la cirugía robótica. *Revista Cubana de Cirugía*, 56(1), 50-61.
- [2] Seo I. Y. (2015). Urologic robotic surgery in Korea: past and present. *Korean journal of urology*, 56(8), 546–552.
- [3] Hagen, M. E., Stein, H., & Curet, M. J. (2014). Introduction to the robotic system. In *Robotics in general surgery* (pp. 9-15). Springer, New York, NY.
- [4] Redacción Médica (9 de marzo de 2022). *Instalado el sistema robótico da Vinci número 100 de la Península Ibérica*. Redacción Médica. <https://www.redaccionmedica.com/secciones/tecnologia/instalado-el-sistema-robotico-da-vinci-numero-100-de-la-peninsula-iberica-3029>.
- [5] Orihuela, R. J. P. (2015). Robot da Vinci: El quirófano del futuro. *Perfiles de Ingeniería*, 11(11).
- [6] Pérez Valero, S., Cuadros Rivera, V., & Torrego Barroso, N. (2019). Protocolo de actuación de enfermería quirúrgica en cirugía robótica. *Index de Enfermería*, 28(4), 214-218.

Anexo 1. Planos.

Índice

- Plano 1.** **Base de Motores.**
- Plano 2.** **Base de Motores.**
- Plano 3.** **Carcasa de Motores.**
- Plano 4.** **Acople EndoWrist.**
- Plano 5.** **Disco de Conexión.**
- Plano 6.** **Acople 1 EndoWrist y UR3.**
- Plano 7.** **Acople 1 EndoWrist y UR3.**
- Plano 8.** **Acople 2 EndoWrist y UR3.**

8 7 6 5 4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

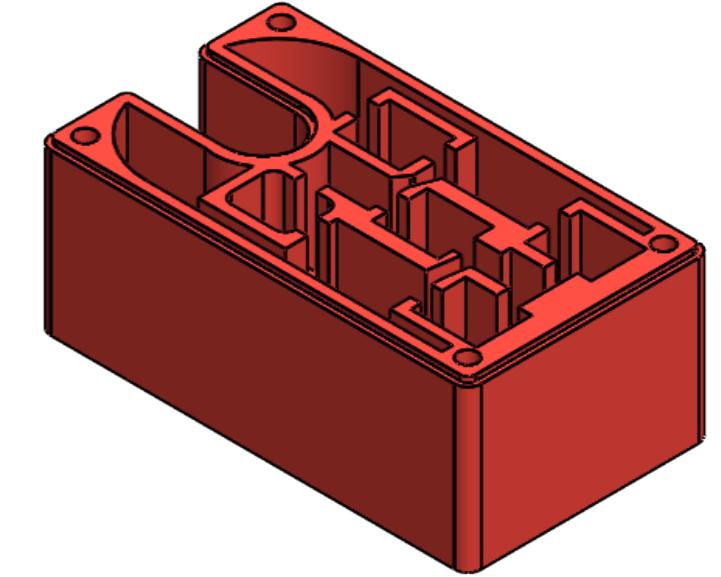
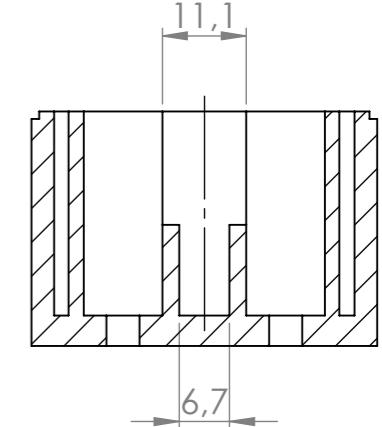
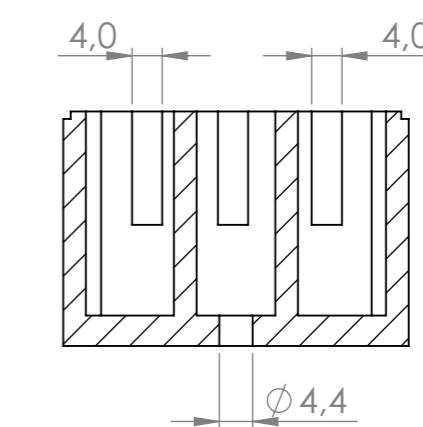
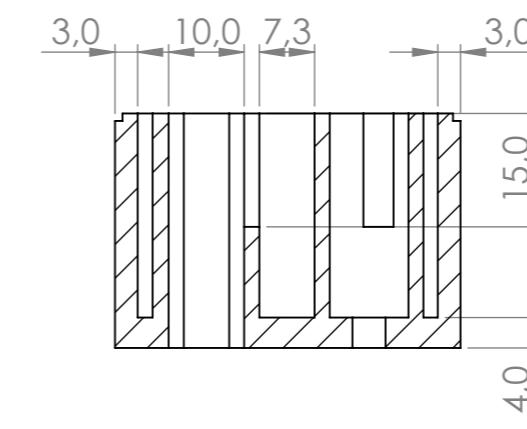
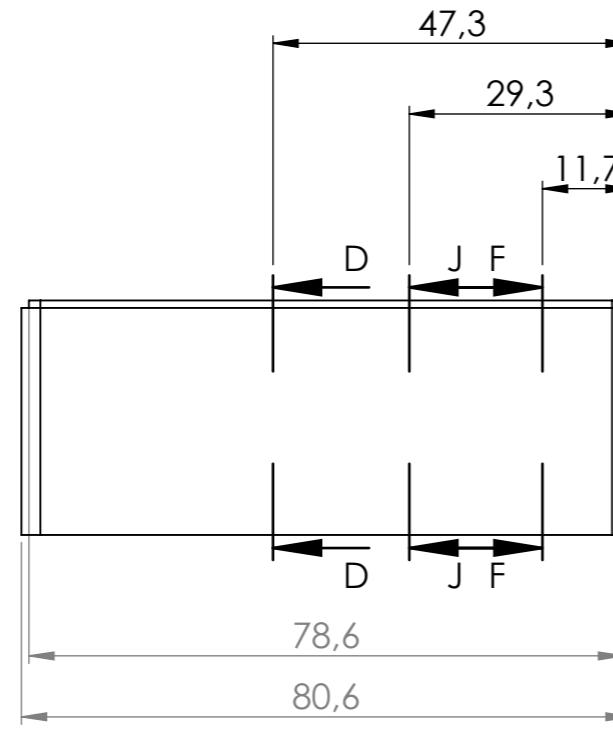
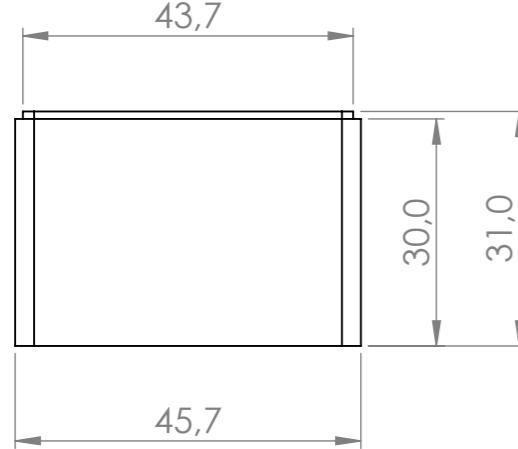
C

B

B

A

A

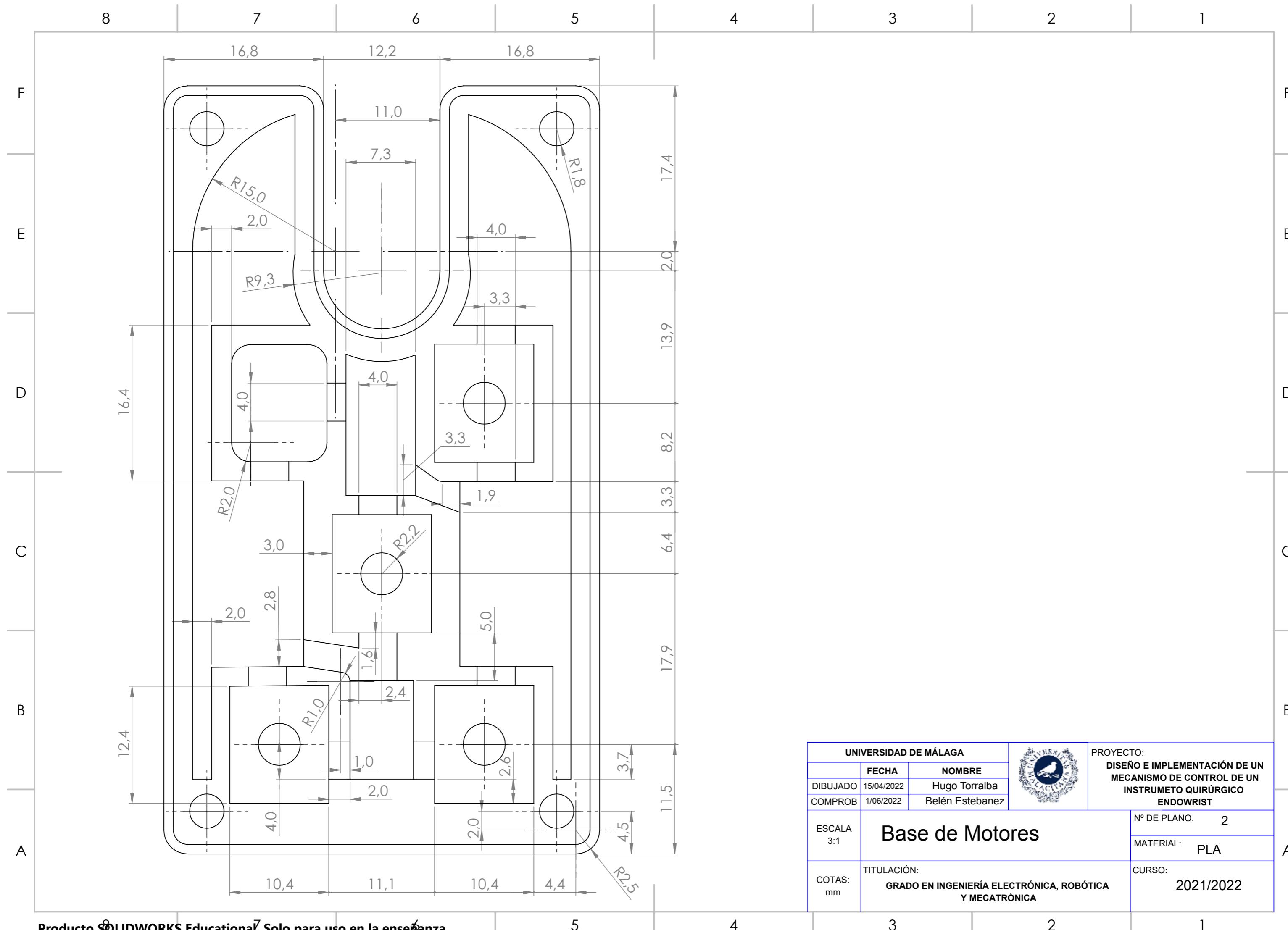


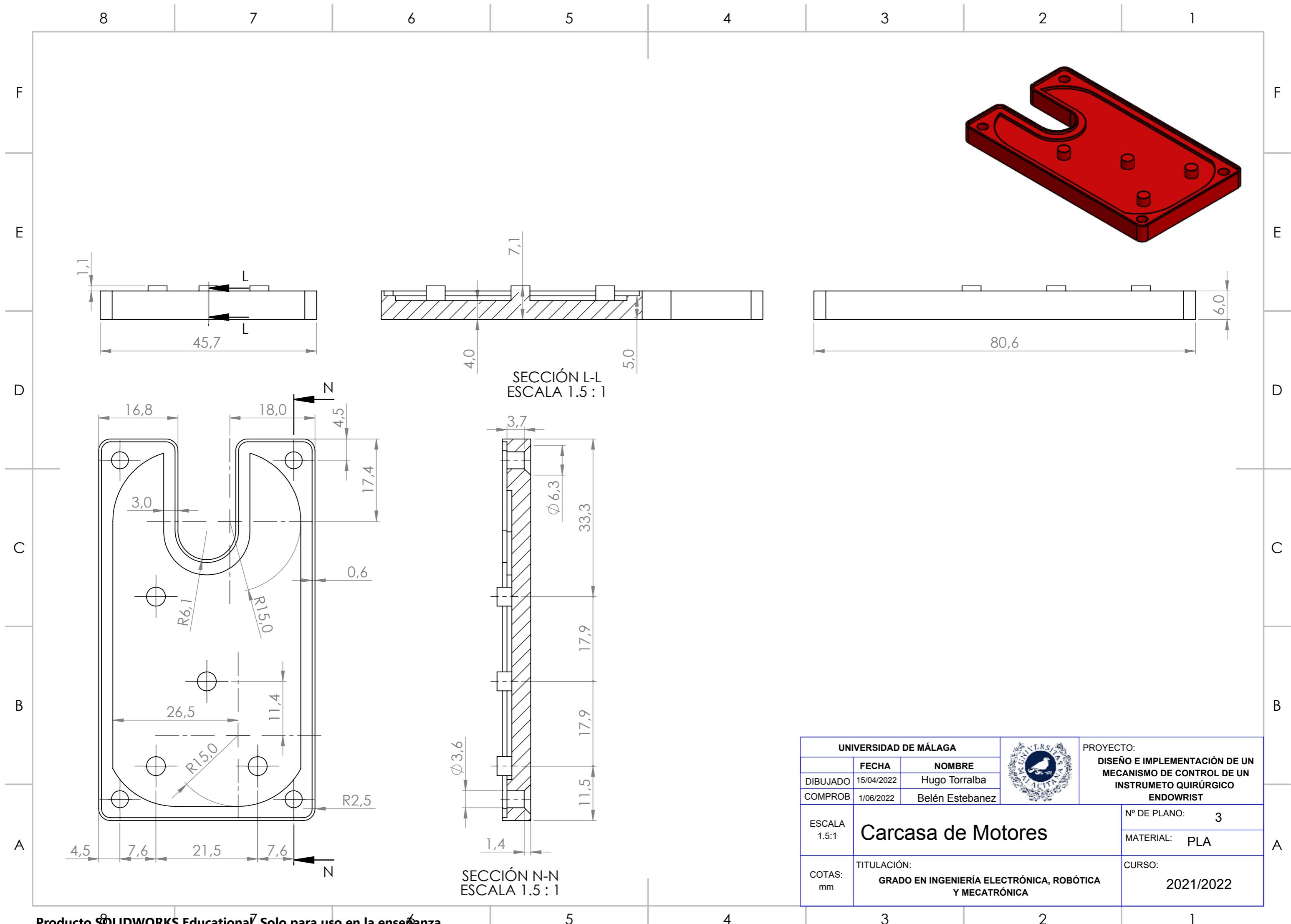
SECCIÓN D-D

SECCIÓN F-F

SECCIÓN J-J

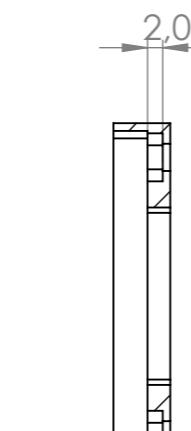
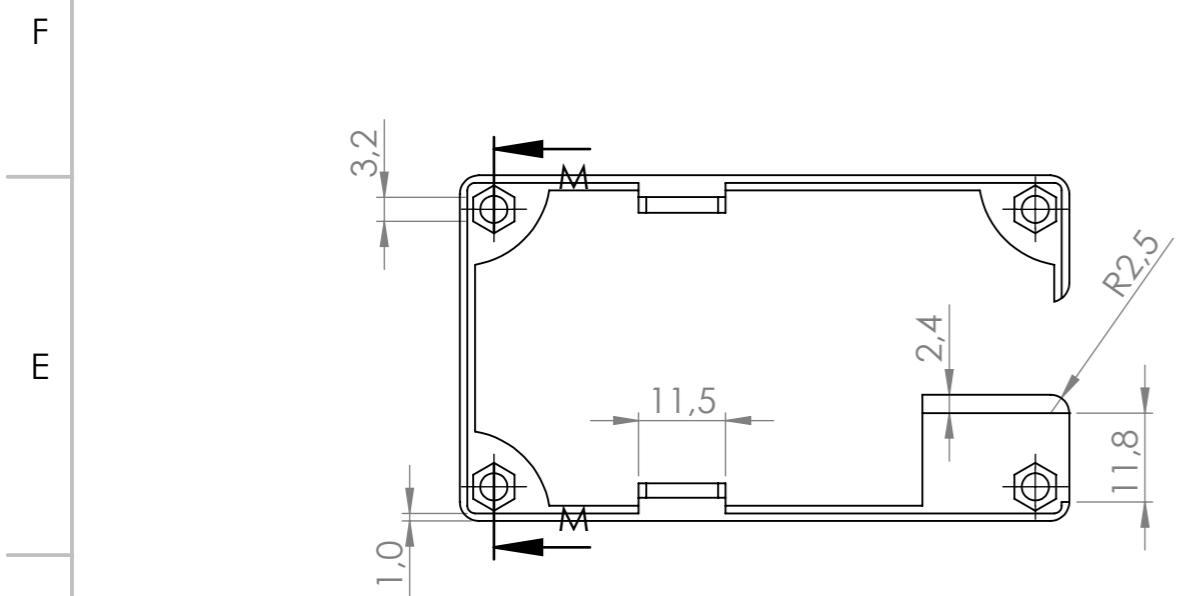
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA			PROYECTO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MECANISMO DE CONTROL DE UN INSTRUMENTO QUIRÚRGICO ENDOWRIST
DIBUJADO	FECHA	NOMBRE	
COMPROB	15/04/2022	Hugo Torralba	
ESCALA	1:1	Base de Motores	
COTAS:	mm	TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, ROBÓTICA Y MECATRÓNICA	
CURSO: 2021/2022			MATERIAL: PLA



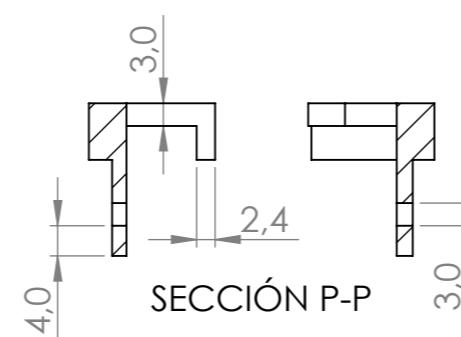
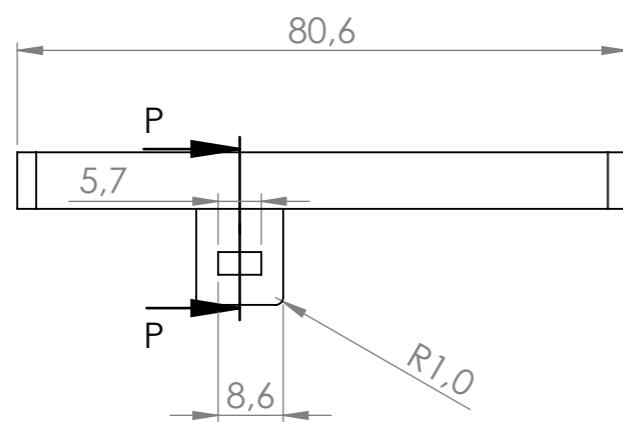


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

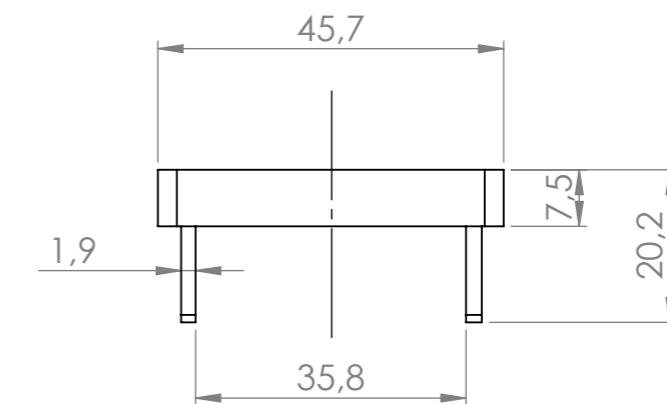
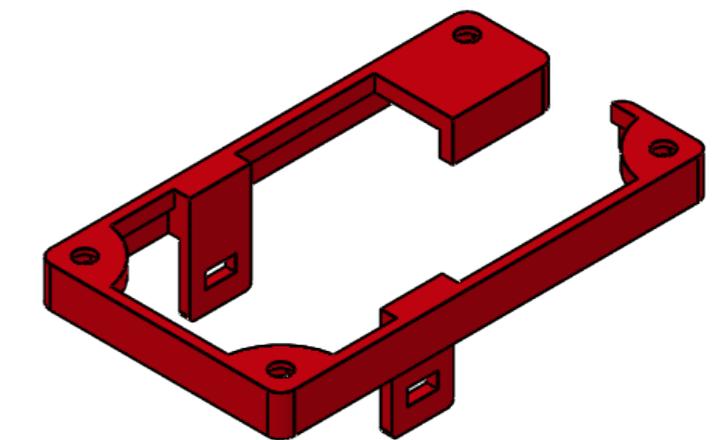
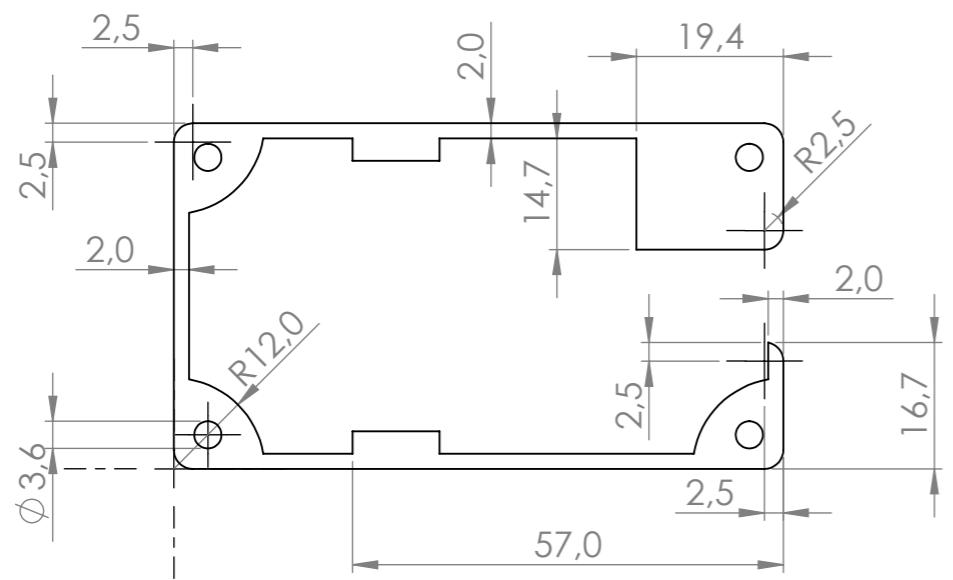
8 7 6 5 4 3 2 1



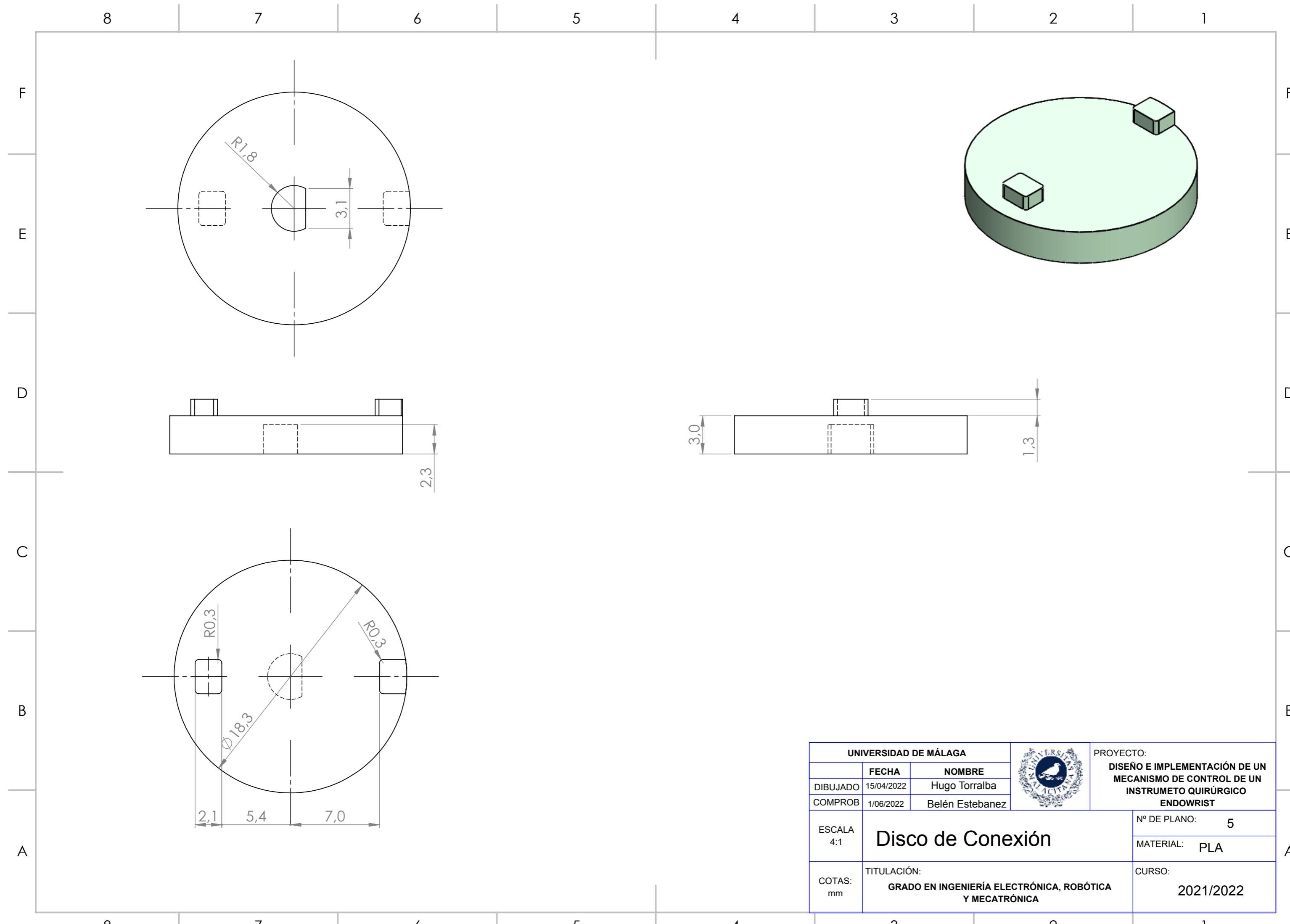
SECCIÓN M-M

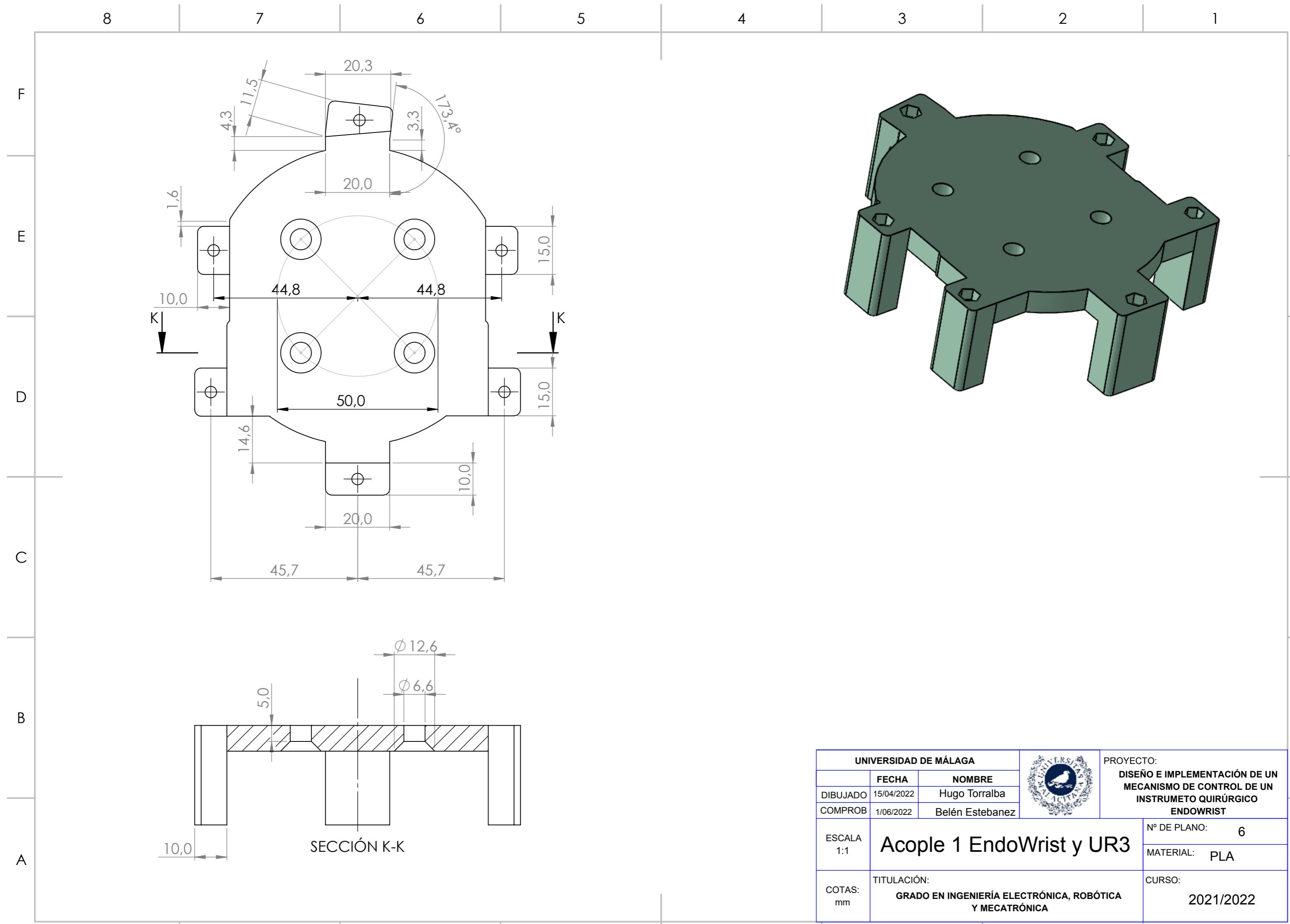


SECCIÓN P-P

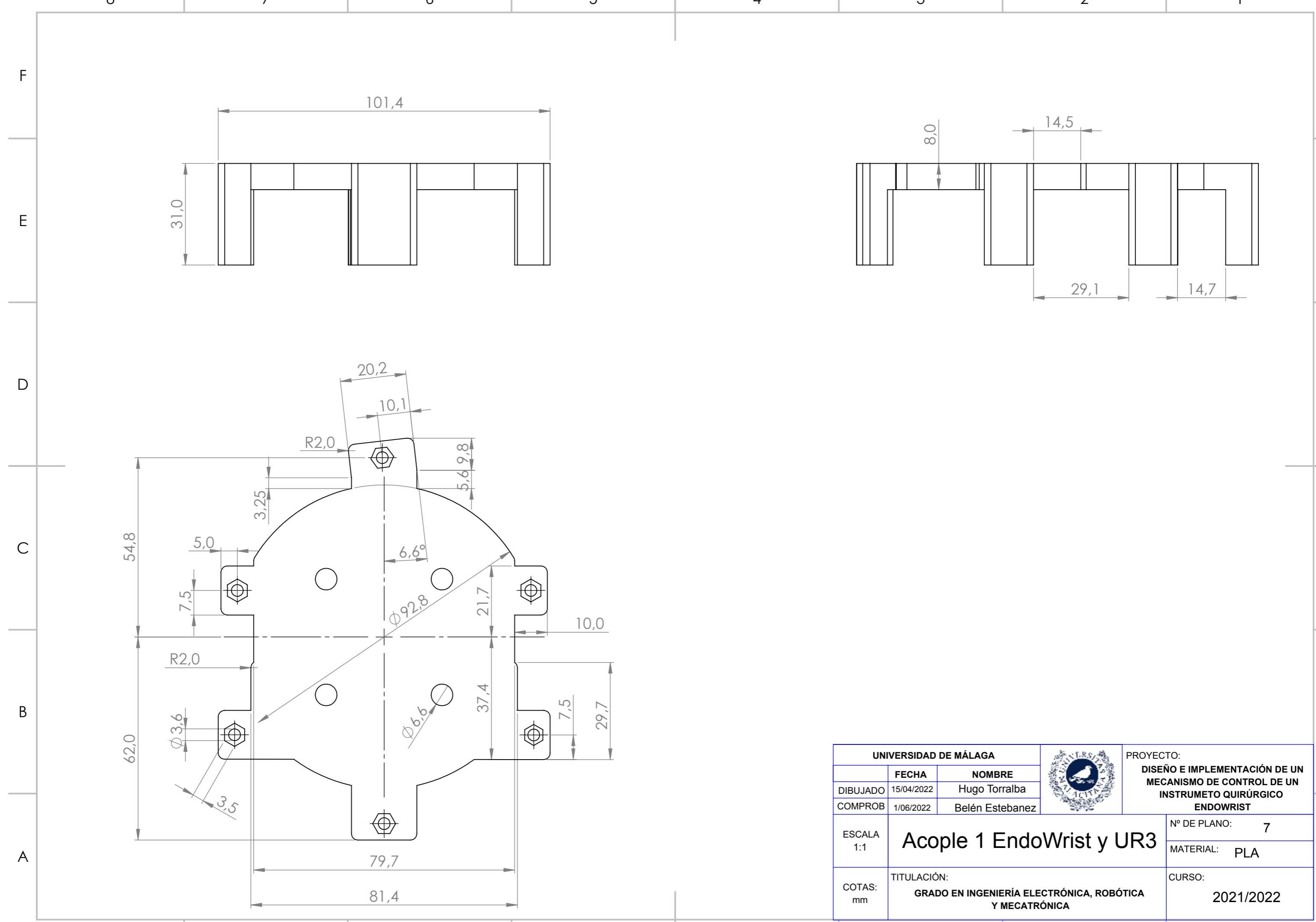


UNIVERSIDAD DE MÁLAGA			PROYECTO:
	FECHA	NOMBRE	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MECANISMO DE CONTROL DE UN INSTRUMENTO QUIRÚRGICO ENDOWRIST
DIBUJADO	15/04/2022	Hugo Torralba	
COMPROB	1/06/2022	Belén Estebanez	
ESCALA 1:1	Acople EndoWrist		Nº DE PLANO: 4
COTAS: mm	TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, ROBÓTICA Y MECATRÓNICA		MATERIAL: PLA
			CURSO: 2021/2022





UNIVERSIDAD DE MÁLAGA			PROYECTO:
	FECHA	NOMBRE	
DIBUJADO	15/04/2022	Hugo Torralba	
COMPROB	1/06/2022	Belén Estebanez	
ESCALA 1:1	Acople 1 EndoWrist y UR3		
COTAS: mm	TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, ROBÓTICA Y MECATRÓNICA		
	CURSO: 2021/2022		



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA			PROYECTO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MECANISMO DE CONTROL DE UN INSTRUMENTO QUIRÚRGICO ENDOWRIST
DIBUJADO	FECHA	NOMBRE	
COMPROB	1/06/2022	Belén Estebanez	
ESCALA 1:1	Acople 1 EndoWrist y UR3		Nº DE PLANO: 7
COTAS: mm	TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, ROBÓTICA Y MECATRÓNICA		
	CURSO: 2021/2022		

