



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

---

## DISEÑO, ENSAMBLAJE Y PROGRAMACIÓN DE UN ROBOT SCARA DE 4 GRADOS DE LIBERTAD

*TRABAJO FINAL DEL*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

*REALIZADO POR*

**Vittorio Marcon Ghidoni**

*TUTORIZADO POR*

**Antonio González Sorribes**

**CURSO ACADÉMICO: 2020/2021**



## AGRADECIMIENTOS

---

A mi familia, por darme apoyo y todas las facilidades posibles durante toda la realización del proyecto.

A mi pareja y mis amigos, por darme el apoyo y la motivación necesarios.

A mi tutor, por invertir tiempo en resolverme todas las dudas con claridad, además de aportarme la información necesaria.

## RESUMEN

---

Con el desarrollo de la robótica, el uso de robots se ha extendido a otros campos fuera de la industria, tales como hospitales, farmacias o laboratorios. Una mayor precisión proporciona más eficiencia y seguridad a la hora de realizar tareas específicas.

En este documento se muestra el proceso de desarrollo de un prototipo de un robot SCARA de 4 grados de libertad destinado a la extracción y almacenamiento de diversos utensilios y materiales de laboratorio, permitiendo una mayor precaución a la hora de manejar instrumentos frágiles o que contengan sustancias peligrosas, evitando poner en riesgo a una persona.

En primer lugar, se realiza un esbozo del diseño inicial del robot en el que se plantea la geometría básica que se tiene en cuenta en las fases posteriores. A continuación, se modelan las diferentes piezas que componen la estructura del robot. En esta fase, se busca una optimización de la geometría, reforzando los lugares expuestos a más tensiones y reduciendo la cantidad de material en las zonas menos importantes, aligerando la estructura y abaratando el coste de producción, y todo ello sin dejar de lado la apariencia del producto.

Una vez modeladas las piezas, se crean las uniones necesarias para obtener el ensamblaje final del robot, verificando que la geometría de cada pieza sea correcta y realizando los ajustes pertinentes.

Una impresora 3D produce cada una de las piezas, de forma que se pueda realizar el montaje de la maqueta. A su vez, se realiza el montaje de los componentes electrónicos encargados de proporcionar el movimiento.

Por último, se realiza la programación del código en ARDUINO para que el robot sea capaz de realizar una tarea sencilla, de forma que se verifique su correcto funcionamiento.

### Palabras Clave:

- Diseño
- Robot
- 4 grados de libertad
- FUSION 360
- ARDUINO
- Impresora 3D
- Prototipo
- Montaje

Amb el desenvolupament de la robòtica, l'ús de robots s'ha estès a altres camps fora de la indústria com, per exemple, hospitals, farmàcies o laboratoris. Una major precisió proporciona més eficiència i seguretat a l'hora de realitzar tasques específiques.

En aquest document es mostra el procés de desenrotllament d'un prototip d'un robot SCARA de 4 graus de llibertat destinat a l'extracció i emmagatzemament de diversos utensilis i materials de laboratori, permetent una major precaució a l'hora de manejar instruments fràgils o que continguin substàncies perilloses, evitant posar en risc a una persona.

En primer lloc, es realitza un esbós del disseny inicial del robot en què es planteja la geometria bàsica que es té en compte en les fases posteriors. A continuació, es modelen les diferents peces que componen l'estructura del robot. En esta fase, es busca una optimització de la geometria, reforçant els llocs exposats a més tensions i reduint la quantitat de material en les zones menys importants, alleugerint l'estructura i abaratint el cost de producció, i tot això sense deixar de costat l'aparença del producte.

Una vegada modelades les peces, es creguen les unions necessàries per a obtindre l'acoblament final del robot, verificant que la geometria de cada peça siga correcta i realitzant els ajustos pertinents.

Una impressora 3D produeix cada una de les peces, de manera que es puga realitzar el muntatge de la maqueta. Al seu torn, es realitza el muntatge dels components electrònics encarregats de proporcionar el moviment.

Finalment, es realitza la programació del codi en ARDUINO perquè el robot siga capaç de realitzar una tasca senzilla, de manera que es verifique el seu funcionament correcte.

Paraules Clau:

- Disseny
- Robot
- 4 graus de llibertat
- FUSION 360
- ARDUINO
- Impressora 3D
- Prototip
- Muntatge

## ABSTRACT

---

With the development of robotics, the use of robots has spread to other fields outside the industry, such as hospitals, pharmacies, or laboratories. A higher precision provides more efficiency and safety when performing specific tasks.

This document shows the process of developing a 4 degrees of freedom SCARA robot prototype destined for the extraction and storage of various laboratory tools and materials, allowing a greater caution when handling fragile instruments or containing dangerous substances, avoiding putting a person at risk.

First, a sketch of the initial design of the robots is made, in which the basic geometry that is taken into account in the later phases is considered. Next, the different parts that make up the robot's structure are modelled. In this phase, an optimization of the geometry is searched, reinforcing the places exposed to more stress and reducing the amount of material in the less important areas, lightening the structure, and lowering the production cost, and all this without ignoring the product appearance.

Once the parts have been modelled, the necessary joints are created to obtain the final assembly of the robot, verifying that the geometry of each part is correct and making the pertinent adjustments.

A 3D printer produces each piece, so that the assembly of the model can be carried out. At the same time, the electronic components in charge of providing the movement are assembled.

Finally, the code is programmed in ARDUINO so that the robot can perform a simple task, so that its correct operation is verified.

### Keywords:

- Design
- Robot
- 4 degrees of freedom
- FUSION 360
- ARDUINO
- 3D Printer
- Prototype
- Assembly



## ÍNDICE GENERAL

---

<b>I. MEMORIA .....</b>	<b>15</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1. MOTIVACIÓN.....	16
1.2. OBJETIVO .....	16
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	17
1.4. HISTORIA DE LA ROBÓTICA.....	18
1.5. MARCO TEÓRICO .....	19
1.5.1. Presentación.....	19
1.5.2. Localización espacial.....	19
1.5.3. Cinemática.....	20
1.6. SOFTWARE UTILIZADO .....	24
1.6.1. Presentación.....	24
1.6.2. Autodesk Fusion 360 .....	24
1.6.3. Matlab .....	24
1.6.4. Robotscene.....	25
1.6.5. Adobe Photoshop.....	25
1.6.6. Arduino IDE .....	26
1.6.7. Tinkercad .....	26
2. DESARROLLO .....	27
2.1. PRESENTACIÓN .....	27
2.2. ANTECEDENTES .....	27
2.3. DISEÑO INICIAL.....	28
2.4. SELECCIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS .....	30
2.4.1. Presentación.....	30
2.4.2. Arduino UNO R3 .....	30
2.4.3. cable USB 2.0 A macho a B macho .....	31
2.4.4. Placa de pruebas.....	32
2.4.5. Servomotores SG90 y MG996R.....	32
2.4.6. Cables puente macho-macho .....	33
2.4.7. Fuente de alimentación externa FAC-363B.....	33

2.5. DISEÑO Y MODELADO DE LAS PIEZAS .....	34
2.5.1. Presentación y características del diseño .....	34
2.5.2. Descripción del proceso de modelado .....	34
2.6. ENSAMBLAJE EN FUSION 360 .....	44
2.6.1. Presentación.....	44
2.6.2. Sub-ensamblaje de la base.....	44
2.6.3. Sub-ensamblaje del brazo .....	45
2.6.4. Sub-ensamblaje de la pinza.....	45
2.6.5. Ensamblaje final.....	46
2.7. RANGO ARTICULAR DEL ROBOT .....	48
2.8. ANÁLISIS CINEMÁTICO .....	50
2.8.1. Presentación.....	50
2.8.2. Cinemática directa .....	51
2.8.3. Cinemática inversa.....	54
2.9. IMPRESIÓN Y MONTAJE DEL ROBOT .....	56
2.9.1. Presentación.....	56
2.9.2. Proceso de impresión .....	57
2.9.3. Rediseño de piezas .....	57
2.9.4. Montaje del robot .....	58
2.10. CONEXIONADO DE LOS COMPONENTES .....	60
2.11. PROGRAMACIÓN EN ARDUINO .....	62
2.11.1. Presentación .....	62
2.11.2. Descripción de las acciones propuestas .....	62
2.11.3. Desarrollo del código .....	63
3. ENSAYO Y CONCLUSIONES .....	65
3.1. ENSAYO Y RESULTADOS.....	65
3.2. CONCLUSIONES Y POSIBLES MEJORAS .....	66
4. BIBLIOGRAFÍA .....	67

<b>II. PLANOS</b> .....	<b>69</b>
1. ENSAMBLAJE ROBOT SCARA .....	70
1.1. SUB-ENSAMBLAJE BASE .....	71
1.1.1. Base.....	72
1.1.2. Soporte.....	73
1.1.3. Base hombro .....	74
1.1.4. Hombro .....	75
1.2. SUB-ENSAMBLAJE BRAZO .....	76
1.2.1. Eslabón 1 .....	77
1.2.2. Eslabón 2 .....	78
1.2.3. Varilla .....	79
1.2.4. Transmisor varillas.....	80
1.2.5. Eslabón 3 .....	81
1.2.6. Engranaje .....	82
1.2.7. Recubrimiento .....	83
1.2.8. Tapa .....	84
1.3. SUB-ENSAMBLAJE PINZA.....	85
1.3.1. Muñeca pinza .....	86
1.3.2. Cuerpo pinza.....	87
1.3.3. Mordaza .....	88
1.3.4. Transmisor de la mordaza .....	89
<b>III. PLIEGO DE CONDICIONES</b> .....	<b>91</b>
1. OBJETO.....	92
2. CONDICIONES DE LOS MATERIALES .....	93
2.1. ENSAMBLAJE DE LA BASE .....	93
2.1.1. Base.....	93
2.1.2. Soporte.....	93
2.1.3. Base del hombro .....	94
2.1.4. Hombro .....	94
2.2. ENSAMBLAJE DEL BRAZO .....	95
2.2.1. Eslabón 1 .....	95

## Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

2.2.2. Eslabón 2 .....	95
2.2.3. Varilla .....	96
2.2.4. Transmisor de las varillas .....	96
2.2.5. Eslabón 3 .....	97
2.2.6. Engranaje .....	97
2.2.7. Recubrimiento .....	98
2.2.8. Tapa .....	98
2.3. ENSAMBLAJE PINZA .....	99
2.3.1. Muñeca de la pinza .....	99
2.3.2. Cuerpo de la pinza .....	99
2.3.3. Mordaza .....	100
2.3.4. Transmisor de la mordaza .....	100
3. CONDICIONES DE LA EJECUCIÓN .....	101
3.1. DESCRIPCIÓN .....	101
3.2. CONTROL DE CALIDAD .....	102
4. PRUEBAS DE SERVICIO .....	103
<b>IV. PRESUPUESTO .....</b>	<b>105</b>
1. PRESENTACIÓN .....	106
2. PRESUPUESTO .....	107
2.1. COMPONENTES ELECTRÓNICOS .....	107
2.2. TORNILLERÍA .....	107
2.3. MANO DE OBRA Y MATERIAL DE TRABAJO .....	108
2.4. PRESUPUESTO TOTAL .....	108
<b>V. ANEXOS .....</b>	<b>110</b>
1. ESPECIFICACIONES DE LOS MOTORES .....	111
2. RESOLUCIÓN DE LAS MATRICES DE PASO EN MATLAB .....	112
3. PRIMER PROGRAMA. COMPROBACIÓN DE MOVIMIENTO .....	116
4. SEGUNDO PROGRAMA. SIMULACIÓN .....	119

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

---

### ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Relación entre los componentes que conforman el entorno del robot.....	19
<b>Figura 2:</b> Relación entre la cinemática directa y la inversa.....	20
<b>Figura 3:</b> Representación de los eslabones de un robot SCARA.....	22
<b>Figura 4:</b> Logotipo de Autodesk Fusion 360 .....	24
<b>Figura 5:</b> Logotipo de Matlab .....	25
<b>Figura 6:</b> Logotipo de RobotScene .....	25
<b>Figura 7:</b> Logotipo de Adobe Photoshop .....	25
<b>Figura 8:</b> Logotipo de Arduino.....	26
<b>Figura 9:</b> Logotipo de Tinkercad .....	26
<b>Figura 10:</b> Diseño simplificado de un robot SCARA.....	27
<b>Figura 11:</b> Robot SCARA modelo EPSON SCARA T3-401S.....	28
<b>Figura 12:</b> Primer boceto del prototipo .....	28
<b>Figura 13:</b> Segundo boceto del prototipo.....	29
<b>Figura 14:</b> Pinza lineal .....	29
<b>Figura 15:</b> Boceto de la pinza.....	30
<b>Figura 16:</b> Placa Arduino UNO R3 y componentes que la conforman .....	31
<b>Figura 17:</b> Cable USB 2.0 para Arduino UNO R3.....	31
<b>Figura 18:</b> Placa de pruebas .....	32
<b>Figura 19:</b> Servomotor SG90.....	32
<b>Figura 20:</b> Servomotor MG996R .....	33
<b>Figura 21:</b> Cables puente macho-macho .....	33
<b>Figura 22:</b> Fuente de alimentación utilizada.....	34
<b>Figura 23:</b> Bocetos y geometría de la base.....	35
<b>Figura 24:</b> Modelado de la base .....	35
<b>Figura 25:</b> Bocetos y geometría del soporte.....	35
<b>Figura 26:</b> Modelado del soporte.....	35
<b>Figura 27:</b> Bocetos y geometría de la base del hombro .....	36
<b>Figura 28:</b> Modelado de la base del hombro .....	36
<b>Figura 29:</b> Bocetos y geometría del hombro.....	37
<b>Figura 30:</b> Modelado del hombro. Vista delantera superior .....	37
<b>Figura 31:</b> Modelado del hombro. Vista trasera superior .....	37
<b>Figura 32:</b> Modelado del hombro. Vista trasera inferior .....	37
<b>Figura 33:</b> Bocetos y geometría del eslabón 1 .....	37
<b>Figura 34:</b> Modelado del eslabón 1 .....	37
<b>Figura 35:</b> Bocetos y geometría del eslabón 2 .....	38
<b>Figura 36:</b> Modelado del eslabón 2 .....	38
<b>Figura 37:</b> Bocetos y geometría de la varilla.....	39
<b>Figura 38:</b> Modelado de la varilla.....	39

<b>Figura 39:</b> Bocetos y geometría del transmisor de las varillas .....	39
<b>Figura 40:</b> Modelado del transmisor de las varillas .....	39
<b>Figura 41:</b> Bocetos y geometría del eslabón 3 .....	40
<b>Figura 42:</b> Modelado del eslabón 3 .....	40
<b>Figura 43:</b> Bocetos y geometría del engranaje .....	40
<b>Figura 44:</b> Modelado del engranaje .....	40
<b>Figura 45:</b> Bocetos y geometría del recubrimiento .....	41
<b>Figura 46:</b> Modelado del recubrimiento .....	41
<b>Figura 47:</b> Bocetos y geometría de la tapa .....	41
<b>Figura 48:</b> Modelado de la tapa .....	41
<b>Figura 49:</b> Bocetos y geometría de la muñeca de la pinza .....	42
<b>Figura 50:</b> Modelado de la muñeca de la pinza .....	42
<b>Figura 51:</b> Bocetos y geometría del cuerpo de la pinza .....	42
<b>Figura 52:</b> Modelado del cuerpo de la pinza .....	42
<b>Figura 53:</b> Bocetos y geometría de la mordaza .....	43
<b>Figura 54:</b> Modelado de la mordaza .....	43
<b>Figura 55:</b> Bocetos y geometría del transmisor de la mordaza .....	43
<b>Figura 56:</b> Modelado del transmisor de la mordaza .....	43
<b>Figura 57:</b> Logotipo de GrabCAD .....	44
<b>Figura 58:</b> Sub-ensamblaje de la base en Fusion 360. Vista delantera superior .....	44
<b>Figura 59:</b> Sub-ensamblaje de la base en Fusion 360. Vista trasera inferior .....	44
<b>Figura 60:</b> Sub-ensamblaje del brazo en Fusion 360. Vista delantera superior .....	45
<b>Figura 61:</b> Sub-ensamblaje del brazo en Fusion 360. Vista trasera inferior .....	45
<b>Figura 62:</b> Sub-ensamblaje de la pinza en Fusion 360. Vista delantera superior .....	46
<b>Figura 63:</b> Sub-ensamblaje de la pinza en Fusion 360. Vista trasera inferior .....	46
<b>Figura 64:</b> Pinza abierta .....	46
<b>Figura 65:</b> Pinza cerrada .....	46
<b>Figura 66:</b> Ensamblaje del robot SCARA .....	47
<b>Figura 67:</b> Ventana emergente de la herramienta "medir" .....	47
<b>Figura 68:</b> Posición máxima del eslabón 1 .....	48
<b>Figura 69:</b> Posición máxima del eslabón 2 (eslabón 1 en reposo) .....	49
<b>Figura 70:</b> Posición máxima del brazo .....	49
<b>Figura 71:</b> Posición máxima del eslabón 3 .....	49
<b>Figura 72:</b> Parámetros de cinemática directa del robot .....	51
<b>Figura 73:</b> Posición de reposo del robot .....	52
<b>Figura 74:</b> Geometría de la base en Robotscene .....	53
<b>Figura 75:</b> Geometría del eslabón 1 en Robotscene .....	53
<b>Figura 76:</b> Geometría del eslabón 2 en Robotscene .....	53
<b>Figura 77:</b> Geometría del eslabón 3 en Robotscene .....	53
<b>Figura 78:</b> Geometría de la pinza en Robotscene .....	53
<b>Figura 79:</b> Robot obtenido en Robotscene y tabla D-H correspondiente .....	54
<b>Figura 80:</b> Representación trigonométrica del brazo .....	55
<b>Figura 81:</b> Posibles configuraciones del brazo (rojo) .....	55
<b>Figura 82:</b> Montaje de la base, el soporte y la base del hombro .....	58
<b>Figura 83:</b> Montaje del eslabón 1 y el eslabón 2 .....	58
<b>Figura 84:</b> Montaje del eslabón 2, el eslabón 3, el engranaje y 2 servomotores SG90 .....	58

<b>Figura 85:</b> Ensamblaje de la base y el brazo.....	59
<b>Figura 86:</b> Montaje de la pinza.....	59
<b>Figura 87:</b> Ensamblaje final.....	60
<b>Figura 88:</b> Esquema del conexionado, indicando a qué parte del robot pertenece cada motor.....	61
<b>Figura 89:</b> Conexionado del robot .....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Rango articular y distancia del robot .....	50
<b>Tabla 2:</b> Tabla Denavit-Hartenberg del robot.....	51
<b>Tabla 3:</b> Lista de comprobaciones previas al funcionamiento del robot .....	103
<b>Tabla 4:</b> Componentes electrónicos.....	107
<b>Tabla 5:</b> Tornillería .....	107
<b>Tabla 6:</b> Mano de obra y material de trabajo .....	108
<b>Tabla 7:</b> Presupuesto final .....	108
<b>Tabla 8:</b> Especificaciones de los motores .....	111



## I. MEMORIA

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. MOTIVACIÓN

A lo largo de este trabajo de final de grado se pretende llevar a cabo el desarrollo de un robot original que demuestre la eficiencia y utilidad de este tipo de tecnología fuera del sector industrial, aplicando los conocimientos adquiridos a lo largo del grado de ingeniería mecánica junto al uso de programas de diseño asistido por ordenador como es el Fusion 360.

Además, todo ello se pretende combinar con la electrónica y la programación, utilizando un microcontrolador Arduino para proporcionar funcionalidad y automatización al prototipo, y desarrollando de esta manera un mayor conocimiento en estos dos campos.

## 1.2. OBJETIVO

El principal objetivo de este proyecto es el diseño y ensamblaje del prototipo de un robot tipo SCARA de 4 grados de libertad destinado a trabajar con instrumentos delicados en laboratorios médicos o de investigación, y su posterior funcionamiento automático a través de la programación de un microcontrolador Arduino que controle cada uno de los motores que forman parte de la maqueta. Para ello, se va a utilizar un programa de diseño 3D para modelar las piezas y una impresora 3D encargada de fabricarlas, de forma que se obtenga un prototipo ligero, de producción sencilla y accesible y, sobre todo, económico.

Además, dada la estructura de este tipo de robots, se busca diseñar una pinza que le permita realizar tareas de tipo "pick & place" de instrumentos cilíndricos como probetas o tubos de ensayo con la mayor seguridad posible. Por lo tanto, también se busca dar un enfoque original a este tipo de tecnología.

Durante el proyecto, se han planteado otros objetivos tales como emplear los conocimientos de robótica para poder llevar a cabo los cálculos cinemáticos del robot.

Por último, se persigue el objetivo de ampliar los conocimientos de programación y electrónica para poder utilizar correctamente un microcontrolador Arduino y realizar adecuadamente el montaje de todos los componentes electrónicos.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El desarrollo de la robótica ha permitido un claro aumento en la eficiencia de producción en los sectores industriales, pero además de eso, se ha demostrado su gran utilidad en otros sectores, como el espacial o el de la medicina. Sin embargo, este tipo de tecnología todavía tiene que desarrollarse mucho más, de forma que se puedan utilizar robots en tareas que puedan resultar peligrosas para un trabajador humano o que necesiten delicadeza y eficiencia.

Por eso mismo, este proyecto va a estar enfocado en diseñar una maqueta de un robot que se pueda utilizar en laboratorios o lugares en los que un ser humano podría estar expuesto a situaciones de riesgo, ya sea por la naturaleza del lugar o porque se encuentren elementos peligrosos para la salud.

Junto a la herramienta que se ha diseñado, el robot puede realizar tareas de manipulación de instrumentos contaminados o que contengan sustancias nocivas, situaciones en las que una persona tendría que equiparse un traje de seguridad y realizar una importante limpieza. Además, dada la estructura que presentan los robots SCARA, podrían diseñarse una mayor cantidad de herramientas para ampliar las funciones que el robot podría realizar como, por ejemplo, verter de forma exacta sustancias en diferentes tubos de ensayo.

Por tanto, el diseño de este robot propone aumentar la seguridad en sectores de investigación, reduciendo la exposición de las personas a elementos peligrosos. Junto a esto, una programación sencilla permitiría que no hiciera falta grandes conocimientos de robótica y programación para poder utilizar esta herramienta, y todo esto podría aumentar la eficiencia de trabajo y lograr mejores y más rápidos resultados.

## 1.4. HISTORIA DE LA ROBÓTICA

La palabra “robot” tiene su origen en la palabra checa “robota” (o “roboti” en plural) que se traduce como servidumbre. Este término se utilizó por primera vez en 1921, cuando Karel Čapek publicó una novela de ciencia ficción titulada “Los Robots Universales de Rossum”. En esa novela se imagina a un conjunto de sirvientes que son capaces de sustituir al ser humano en el trabajo. Más tarde, Isaac Asimov popularizó el término en 1950 tras la publicación de “Yo, Robot”.

Sin embargo, este pensamiento tiene su origen miles de años atrás. Desde el siglo III a.C. existían en Alejandría una serie de inventores que diseñaron varias máquinas capaces de imitar los movimientos de los seres vivos. De todos ellos, más célebre de todos fue Herón de Alejandría, un matemático e ingeniero del siglo I d.C. que inventó la considerada primera máquina de vapor de la historia, conocida como “eolípila”, que consistía en una esfera hueca con agua en su interior y que giraba al aplicarle calor a causa de la expulsión del vapor por sus orificios. [1]

Más tarde, alrededor del año 1495, Leonardo da Vinci diseñó un robot humanoide parecido a un guerrero vestido con una armadura que estaba pensado para realizar movimientos similares a los del ser humano.

En 1953, se construyó en Inglaterra el primer sistema móvil que podía ser considerado un robot, y cuya función era la de seguir un haz de luz. 15 años más tarde, un instituto de Estados Unidos creó un robot capaz de desplazarse por sí mismo gracias a una cámara de visión y una serie de sensores. En la década de los 70, junto a la tercera revolución industrial empezaron a desarrollarse brazos robotizados y su uso empezó a extenderse en la industria.

Actualmente, el desarrollo de la robótica ha traído grandes avances en la sociedad, que van desde la creación de prótesis para las personas hasta vehículos completamente automatizados. Además, la robótica trajo consigo la inteligencia artificial, que permite dotar a los robots de la capacidad de toma de decisiones. No obstante, todavía son muchos los avances que deben realizarse para perfeccionar todos estos avances tecnológicos.

## 1.5. MARCO TEÓRICO

### 1.5.1. Presentación

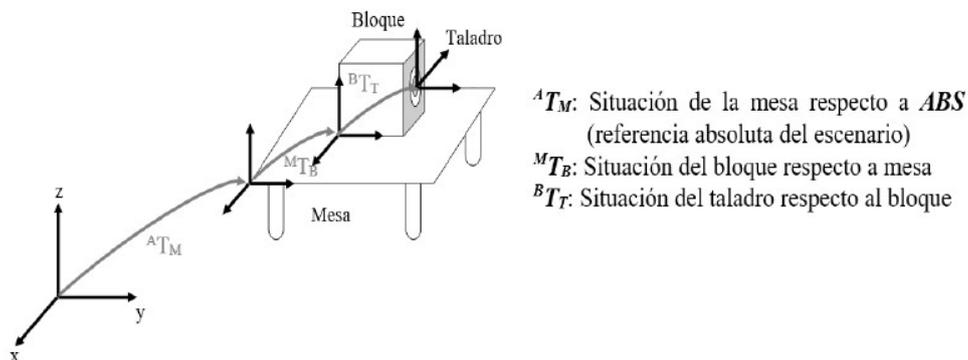
A lo largo de este apartado se explicará en qué consiste, por un lado, la representación de la posición y orientación de un robot y, por otro, la cinemática directa e inversa. Cabe recalcar que los cálculos del análisis cinemático se realizan en el apartado 2.8 de este documento, debido a que este es meramente teórico.

### 1.5.2. Localización espacial

Para poder situar un brazo robótico en el espacio, es necesario especificar la posición y orientación del extremo con respecto a algún sistema de referencia. Para ello, se necesita a su vez conocer la posición de todos los eslabones que conforman el robot.

A partir de cálculos matemáticos fundamentalmente matriciales como es la matriz de transformación homogénea, es posible modelar el entorno del robot y situarlo en el espacio relacionándolo con otros sistemas de referencia, como se puede apreciar en la

**Figura 1:**



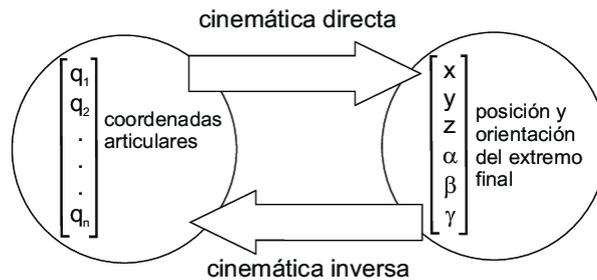
**Figura 1:** Relación entre los componentes que conforman el entorno del robot

En el caso anterior, las matrices de transformación definirían la relación existente entre 2 sistemas de referencia. Sin embargo, sería posible obtener la relación entre la referencia absoluta y la herramienta realizando la multiplicación de todas las matrices.

### 1.5.3. Cinemática

La cinemática se define como el estudio del movimiento sin considerar las fuerzas que lo causan. En el caso de la cinemática del robot, consiste en estudiar el movimiento del robot respecto de un sistema de referencia. De esta forma, se busca describir de forma analítica el movimiento del robot como una función de tiempo y hallar la localización del extremo terminal del robot, además de sus coordenadas articulares. [2][3][4]

Dentro de la cinemática existe, por un lado, la cinemática directa y, por otro la cinemática inversa, y ambas se encuentran relacionadas **Figura 2**.



**Figura 2:** Relación entre la cinemática directa y la inversa

A continuación, se detallan ambos tipos de análisis cinemáticos.

#### 1.5.3.1. Cinemática directa

El análisis cinemático directo consiste en hallar la posición y orientación del extremo terminal del robot conociendo los valores de las coordenadas articulares y los parámetros que definen la posición y orientación de los elementos que conforman el robot.

Uno de los métodos más extendidos que permite la solución de la cinemática directa es el denominado Denavit-Hartenberg o D-H. Este método consiste en obtener la cadena cinemática del robot situando los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón. Cada uno de los sistemas de coordenadas se define a partir del sistema de coordenadas anterior y de los ejes de articulación. Además, permite pasar de un eslabón al siguiente a través de 4 transformaciones:

1. Rotar  $\theta_i$  alrededor del eje  $Z_{i-1}$  ( $\theta_i$  es el ángulo con respecto a  $Z_{i-1}$  de  $X_{i-1}$  a  $X_i$ )
2. Trasladar  $d_i$  a lo largo del eje  $Z_{i-1}$  ( $d_i$  es la distancia a lo largo de  $Z_{i-1}$  de  $X_{i-1}$  a  $X_i$ )
3. Trasladar  $a_i$  a lo largo del eje  $X_i$  ( $a_i$  es la distancia a lo largo de  $X_i$  de  $Z_{i-1}$  a  $Z_i$ )
4. Rotar  $\alpha_i$  alrededor del eje  $X_i$  ( $\alpha_i$  es el ángulo con respecto a  $X_i$  de  $Z_{i-1}$  a  $Z_i$ )

Siendo  $i$  el elemento en cuestión.

Para realizar correctamente el método de D-H, se ha desarrollado un algoritmo que describe cada uno de los pasos que se deben llevar a cabo. Los pasos que conforman el algoritmo D-H son los que se describen a continuación:

1. Identificar los eslabones y los ejes de las articulaciones dibujando ejes imaginarios a lo largo de estos. Los eslabones se numeran desde el 1 (la base fija será 0) hasta el n (último eslabón móvil), siendo este el mismo método para numerar las articulaciones.
2. Situar el origen  $O_i$  en la intersección entre los ejes del mismo eslabón con el anterior. En el caso de que no exista intersección, debe reconocerse la perpendicular común entre los ejes consecutivos y situar el origen en la intersección entre el eje actual con la perpendicular.
3. Colocar el eje  $Z_i$  sobre el eje de la articulación  $i+1$ .
4. Colocar el eje  $X_i$  sobre la perpendicular común a los ejes  $Z_i$  y  $Z_{i-1}$ .
5. Colocar el eje  $Y_i$  en relación a los dos ejes anteriores para formar un sistema de referencia dextrógiro.
6. Situar el eje  $z_i$  en el eje de la articulación  $i+1$  y repetir los pasos 4 y 5 para colocar  $x_i$  y  $y_i$ .
7. Situar el sistema de coordenadas asociado a la base  $SC_0$  en cualquier punto a lo largo del eje  $Z_0$ .
8. Situar el sistema de coordenadas asociado al último elemento  $SC_n$  en cualquier parte de este, siempre que el sentido de  $Z_n$  y  $Z_{n-1}$  sea el mismo.
9. Obtener  $\theta_i$ ,  $d_i$ ,  $a_i$  y  $\alpha_i$ .
10. Obtener las matrices de transformación  ${}^{i-1}A_i$ .  
$${}^{i-1}A_i = T(z, \theta_i) \cdot T(0, 0, d_i) \cdot T(a_i, 0, 0) \cdot T(x, \alpha_i)$$
11. Obtener la matriz de transformación  $T$  que relaciona la base con el extremo terminal del robot a partir de la multiplicación de las matrices obtenidas en el paso anterior. La matriz  $T$  define la orientación y la posición del extremo con respecto a la base en función de las coordenadas articulares.

### 1.5.3.2. Cinemática inversa

El análisis cinemático inverso consiste en hallar las coordenadas articulares a partir de la situación deseada del elemento terminal del robot y comprobar que sea posible alcanzar dicha posición. [5]

A la hora de desarrollar el problema cinemático inverso, aparecen ciertos problemas que pueden ocasionar una cierta complejidad en la solución del análisis.

En primer lugar, la solución no tiene por qué ser única, debido a que el robot puede situar los eslabones en distintas configuraciones para alcanzar la posición deseada. En segundo lugar, pueden llegar a aparecer configuraciones que presenten una singularidad, lo que provocaría un comportamiento impredecible del robot y la pérdida de 1 o más grados de libertad, por lo que debe evitarse a toda costa. Por último, la complejidad algebraica y geométrica del análisis es elevada, lo que ralentiza y dificulta hallar la solución del problema.

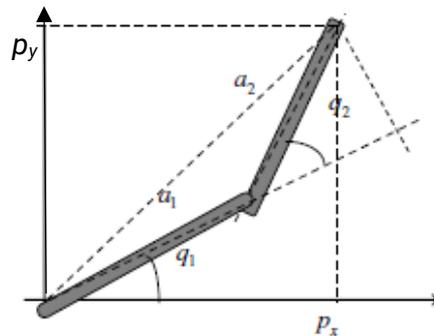
Existen 2 métodos principales de resolución del problema cinemático inverso: los métodos numéricos y los analíticos.

En primer lugar, los métodos numéricos siguen un procedimiento iterativo que está basado en la matriz Jacobiana. Estos métodos presentan muchas dificultades, debido a que su complejidad causa una gran lentitud para la resolución del problema y no siempre converge.

En segundo lugar, los métodos analíticos son una alternativa más sencilla que los métodos numéricos. Los métodos analíticos parten de una solución cerrada, debido a que la cinemática inversa no tiene por qué tener una solución única, y en este caso se permiten incluir reglas como, por ejemplo, señalar los límites de los recorridos que realizan las articulaciones. Además de eso, la solución cerrada es necesaria porque en muchos casos ha de resolverse el problema cinemático inverso en tiempo real.

Dentro de los métodos analíticos aparecen 2 enfoques: el geométrico y los algebraicos.

El enfoque geométrico permite hallar la solución de un robot con pocos grados de libertad realizando cálculos trigonométricos a partir de las posibles configuraciones de los eslabones. Dado que este es el método con el que se realizará el análisis cinemático del prototipo, se mostrará a continuación un ejemplo de solución de cinemática inversa aplicando el enfoque geométrico:



**Figura 3:** Representación de los eslabones de un robot SCARA

En este caso, los parámetros  $q_1$  y  $q_2$  dependen de  $p_x$  y  $p_y$ , y el parámetro  $q_3$  (par prismático del robot) no influiría en la resolución, ya que depende únicamente de  $p_z$ . La solución sería la que se muestra a continuación:

$$p_x^2 + p_y^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos q_2 \rightarrow \begin{cases} q_2 = \pm \cos^{-1} \frac{p_x^2 + p_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \\ q_1 = \tan^{-1} \frac{p_x}{p_y} - \tan^{-1} \frac{a_2 \sin q_2}{a_1 + a_2 \cos q_2} \end{cases}$$

El símbolo  $\pm$  de la primera ecuación indica las dos posibles configuraciones del codo (arriba o abajo).

Por otro lado, los enfoques algebraicos se obtienen a partir de las matriz obtenida en la cinemática directa:

$${}^0T_6(q_1, q_2, \dots, q_6) = \begin{pmatrix} f_{11}(q_1 \dots q_n) & f_{12}(q_1 \dots q_n) & f_{13}(q_1 \dots q_n) & f_{14}(q_1 \dots q_n) \\ f_{21}(q_1 \dots q_n) & f_{22}(q_1 \dots q_n) & f_{23}(q_1 \dots q_n) & f_{24}(q_1 \dots q_n) \\ f_{31}(q_1 \dots q_n) & f_{32}(q_1 \dots q_n) & f_{33}(q_1 \dots q_n) & f_{34}(q_1 \dots q_n) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La matriz  ${}^0T_6$  es algebraica y depende de las coordenadas articulares, y la matriz  $(n \text{ o } a \text{ p})$  representaría la localización deseada del elemento terminal. Sin embargo, este método resulta muy complicado para robots de 6 grados de libertad debido a la dificultad de despejar las ecuaciones y a que estas no son lineales.

Para este tipo de situaciones, se busca aplicar un método denominado desacoplo cinemático, aplicable en robots donde los 3 últimos grados de libertad cortan en un mismo punto, la muñeca. De esta forma, es posible resolver el brazo y la muñeca por separado.

Por un lado, los parámetros de la muñeca  $q_4$ ,  $q_5$  y  $q_6$  pueden obtenerse utilizando los datos de rotación de la matriz  $(n \text{ o } a)$ . A su vez, los parámetros del brazo  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$  se obtienen a partir de la posición definida por  $p_x$ ,  $p_y$  y  $p_z$  y utilizando uno de los métodos de resolución descritos anteriormente.

## 1.6. SOFTWARE UTILIZADO

### 1.6.1. Presentación

Para poder llevar a cabo el proyecto, se han seleccionado una serie de programas capaces de suplir cada una de las necesidades. Los programas que se han utilizado se especifican a continuación:

### 1.6.2. Autodesk Fusion 360

Es una plataforma de software CAD basada en la nube perteneciente a Autodesk. Permite realizar diseños 3D de piezas y ensamblarlas para crear productos. Además, ofrece una gran variedad de funciones además del diseño (como, por ejemplo, análisis de fuerzas, creación de planos o animaciones) que, junto a una interfaz muy sencilla e intuitiva, convierten a este software en uno muy completo para el ámbito del diseño. [6]

A lo largo de este proyecto, se emplea Fusion 360 para diseñar cada una de las piezas que conforman la estructura del robot, llevar a cabo el ensamblaje del conjunto y, además, realizar todos los planos necesarios.

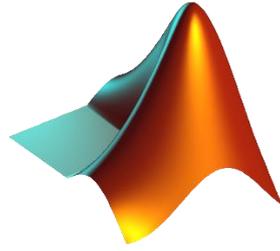


**Figura 4:** Logotipo de Autodesk Fusion 360

### 1.6.3. Matlab

Es un software que presenta un entorno de cálculo técnico con un gran rendimiento en comparación a otros programas del mismo ámbito y que permite realizar análisis numéricos, cálculos matriciales, representaciones gráficas y procesamientos de señales, además de otras funciones que pueden añadirse. La interfaz de trabajo es muy sencilla y las soluciones obtenidas son muy visuales. [7]

A lo largo de este proyecto, se emplea Matlab para llevar a cabo los análisis de cinemática directa e inversa del robot, además de sus respectivas comprobaciones.



**Figura 5:** Logotipo de Matlab

#### 1.6.4. Robotscene

Es un software de simulación y explotación de escenarios robóticos que permite, de una forma muy intuitiva y visual, controlar robots industriales de forma que pueden interactuar con el entorno y simular aplicaciones. [8]

A lo largo de este proyecto, se emplea RobotScene para verificar el análisis cinemático y mostrar visualmente la disposición de los eslabones y las articulaciones del robot.



**Figura 6:** Logotipo de RobotScene

#### 1.6.5. Adobe Photoshop

Es un software de edición perteneciente a Adobe y que permite tanto editar fotografías e imágenes como realizar ilustraciones, además de otras funciones. Presenta un entorno de trabajo profesional con una gran variedad de opciones y una interfaz sencilla.

A lo largo de este proyecto, se emplea Photoshop para realizar bocetos y esquemas iniciales del robot, editar fotografías y añadir información a imágenes relacionadas con la cinemática.



**Figura 7:** Logotipo de Adobe Photoshop

### 1.6.6. Arduino IDE

IDE (Integrated Development Environment) es un software que presenta un conjunto de herramientas dentro de un entorno de programación que permite desarrollar, compilar y verificar el código necesario para hacer funcionar un microcontrolador Arduino a través de un lenguaje de programación similar a C++.

A lo largo de este proyecto, se emplea Arduino IDE para programar el código necesario que permita el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos que conforman el robot. Más adelante, se explica la plataforma de trabajo Arduino.



*Figura 8: Logotipo de Arduino*

### 1.6.7. Tinkercad

Es un software perteneciente a Autodesk que permite, entre otras funciones, realizar modelos 3D y crear montajes electrónicos desde una perspectiva dirigida a la enseñanza. En concreto, a la hora de diseñar montajes electrónicos, permite interactuar con los diferentes componentes y realizar la programación de los elementos que lo necesiten (por ejemplo, microcontroladores).

A lo largo de este proyecto, se emplea Tinkercad para realizar el montaje esquemático de los elementos electrónicos que forman parte del robot y mostrar el circuito de una forma clara y visual.



*Figura 9: Logotipo de Tinkercad*

## 2. DESARROLLO

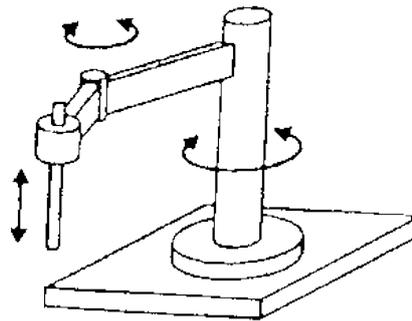
---

### 2.1. PRESENTACIÓN

A lo largo de esta parte, se va a explicar detalladamente el procedimiento que se ha llevado a cabo para desarrollar el prototipo del robot, desde su diseño inicial hasta la ejecución de una tarea sencilla completamente automática, además de sus análisis pertinentes. Por otro lado, se exponen una serie de problemas que han aparecido a lo largo del desarrollo junto a la justificación de las soluciones que se deberían o se han llevado a cabo.

### 2.2. ANTECEDENTES

Para poder llevar a cabo el diseño inicial, es necesario comprender correctamente el funcionamiento de un robot de tipo SCARA. Su brazo es rígido con respecto al eje Z y puede moverse a lo largo de los ejes X e Y, por lo que trabaja a lo largo de un plano.



**Figura 10:** Diseño simplificado de un robot SCARA

Este tipo de robots cuenta con un total de 4 grados de libertad: dos pares de rotación que permiten el movimiento horizontal del brazo, un par prismático que permite subir o bajar la herramienta hasta la posición deseada y una último par de rotación que permite el giro de la muñeca.

Los robots SCARA se caracterizan por realizar ciclos de trabajo rápidos y tener una excelente capacidad de carga, siendo más rápidos que los robots cartesianos y ocupando un volumen muy reducido. A continuación, se puede apreciar un modelo de robot SCARA:



**Figura 11:** Robot SCARA modelo EPSON SCARA T3-401S

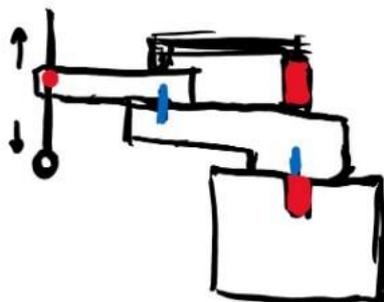
### 2.3. DISEÑO INICIAL

Teniendo en cuenta las particularidades estructurales que caracterizan un robot SCARA, es posible llevar a cabo el diseño inicial del prototipo. Sin embargo, debido a que se va a desarrollar un modelo de tamaño reducido, a modo de maqueta, es necesario tener en cuenta una serie de factores a la hora de realizar el diseño.

Debido al tamaño reducido del prototipo y a la relativa fragilidad de los materiales, situar los motores encargados del movimiento encima de los eslabones que conforman el brazo podría alterar gravemente el funcionamiento del robot debido al peso de estos. Por lo tanto, se busca una solución que permita aligerar la mayor cantidad de carga sobre el brazo en la medida de lo posible. En este caso, se ha pensado en situar los motores principales en la base del robot y utilizar elementos que transmitan el giro del motor a la articulación.

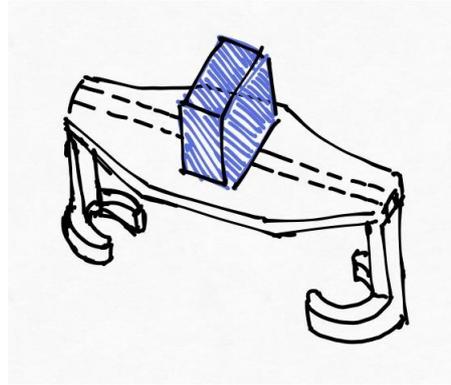
Por otro lado, para poder realizar el movimiento lineal que permite la subida y la bajada de la herramienta, se ha optado por realizar un mecanismo de cremallera que convierta el giro del motor en un desplazamiento lineal.

Teniendo en cuenta estos factores, se procede a realizar un boceto sencillo del diseño del robot que se pretende llevar a cabo. El prototipo contaría con una base, dos eslabones que forman el brazo, un tercer eslabón que se desplaza verticalmente, y la herramienta situada en el extremo del tercer eslabón.



**Figura 12:** Primer boceto del prototipo





**Figura 15:** Boceto de la pinza

Como puede apreciarse, el mecanismo de funcionamiento de la pinza sería el mismo que el de la pinza de referencia y, debido a que la herramienta se encontraría acoplada verticalmente, se han diseñado las mordazas de forma que su extremo semicircular se adapte correctamente al volumen en cuestión.

De esta forma, se puede situar el eje del extremo del brazo (que coincide con el de la herramienta) justo encima del cuerpo que se quiera transportar, facilitando el movimiento que ha de realizar el prototipo para alcanzar dicha posición.

A continuación, se puede realizar una selección de los componentes que permitan el funcionamiento del robot, además del modelado de cada una de las piezas que participan en su ensamblaje.

## 2.4. SELECCIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS

### 2.4.1. Presentación

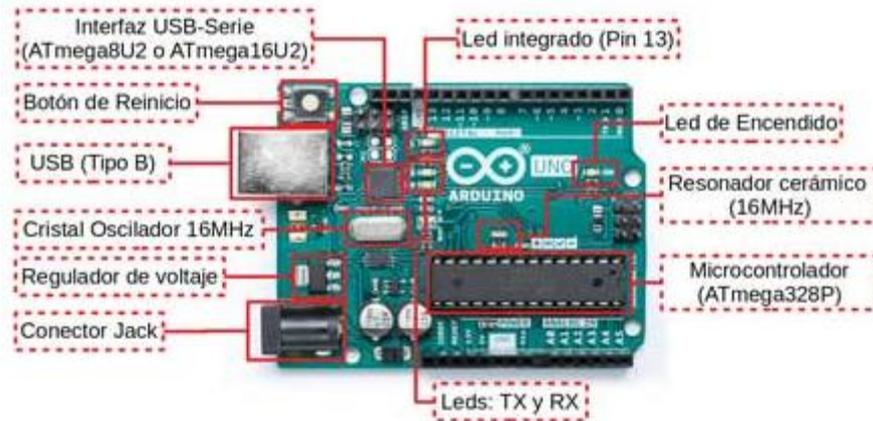
Para poder llevar a cabo este proyecto, son necesarios una serie de componentes que sean capaces de proporcionar movimiento a las articulaciones del robot y que, además de eso, permitan leer correctamente el código encargado de programar el prototipo para trabajar de forma automática. A continuación, se muestran los componentes electrónicos necesarios para el montaje.

### 2.4.2. Arduino UNO R3

Se trata de una placa electrónica funcional basada en un microcontrolador ATMEL. En su composición forman parte 14 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM), 6 entradas analógicas (A0-A5), un oscilador de cristal de 16MHz, un puerto USB y un puerto de alimentación, además de otros

## Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

componentes que aparecen en la **Figura 16**. Este dispositivo debe estar alimentado con una tensión entre 6 y 20V.



**Figura 16:** Placa Arduino UNO R3 y componentes que la conforman

### 2.4.2.1. Plataforma Arduino

Arduino es una plataforma de creación de prototipos electrónicos enfocada en el aprendizaje y formación, basada en hardware y software libre (código accesible y modificable por cualquier usuario) sencillo para su uso por parte de creadores y desarrolladores. Además, permite crear placas destinadas para diferentes usos asignados por la comunidad.

Arduino también ofrece la plataforma Arduino IDE (descrito anteriormente), en la que cualquier usuario puede crear aplicaciones para las placas y compartirlas con el resto de la comunidad.

### 2.4.3. cable USB 2.0 A macho a B macho

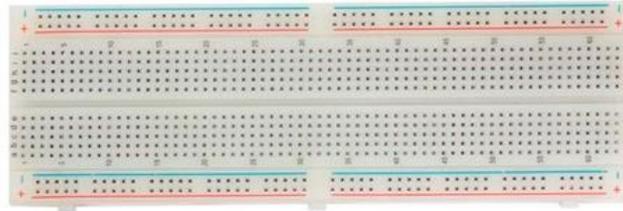
Es utilizado para conectar la placa Arduino al ordenador, haciendo que reciba la alimentación necesaria y el código de la aplicación o programa que se desee ejecutar.



**Figura 17:** Cable USB 2.0 para Arduino UNO R3

#### 2.4.4. Placa de pruebas

También conocida como *protoboard*, se trata de un dispositivo de conexión utilizado en la electrónica para el montaje de circuitos electrónicos. En la placa de pruebas se encuentran una serie agrupaciones de orificios conectados entre sí en serie, permitiendo el desarrollo y montaje de los circuitos de una forma sencilla.



**Figura 18:** Placa de pruebas

#### 2.4.5. Servomotores SG90 y MG996R

Permiten aportar el movimiento necesario para el funcionamiento del robot. Se caracterizan por tener un par muy elevado en comparación a su peso, por lo que no tienen ningún problema en mover los componentes de un robot pequeño. Este tipo de motores contienen un decodificador, el cual convierte los giros del eje del motor en pulsos digitales que pueden ser interpretados por un controlador. Además, contienen un programa que permite controlar la posición, el giro y la velocidad del motor. Los servomotores tienen un total de 3 cables de conexión: uno rojo, que se conecta a la corriente; uno marrón, que se conecta a tierra; y uno naranja, que se conecta a la señal. Se utilizan 2 tipos diferentes de servomotores. [9][10]

En primer lugar, los motores SG90 son los de menor tamaño y son los encargados de mover los elementos más pequeños (o una cantidad pequeña de estos). Su rango de giro es de 180 grados y su modo de operación se encuentra al trabajar a 4.8V.



**Figura 19:** Servomotor SG90

## Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

En segundo lugar, los motores MG996R son los más grandes y pesados y los encargados de mover los elementos más grandes que contienen, a su vez, los elementos pequeños. Su rango de giro es de 180 grados y tiene 2 modos de operación: uno a 4.8V y otro a 6V.



**Figura 20:** Servomotor MG996R

Las especificaciones de los servomotores se encuentran recogidas en el **Anexo 1** perteneciente al Pliego de Condiciones.

### 2.4.6. Cables puente macho-macho

Permiten unir el resto de los componentes entre ellos a través de conectar los orificios de la placa de pruebas, la placa Arduino UNO R3 y los cables hembra de los servomotores.



**Figura 21:** Cables puente macho-macho

### 2.4.7. Fuente de alimentación externa FAC-363B

Tiene la función de aportar energía adicional al circuito, debido a que la alimentación aportada por el Arduino y el ordenador no es suficiente para permitir el funcionamiento de todos los motores.



**Figura 22:** Fuente de alimentación utilizada

## 2.5. DISEÑO Y MODELADO DE LAS PIEZAS

### 2.5.1. Presentación y características del diseño

Una vez realizado el concepto del prototipo que se quiere diseñar y se han seleccionado los motores que se utilizarían, es posible llevar a cabo el modelado de las piezas que conforman el robot.

Es necesario hacer hincapié en el hecho de que las piezas deben ser diseñadas con la idea de que tengan una geometría sencilla para que sea posible realizar su impresión sin problemas y, además de eso, deben permitir que su posterior montaje pueda realizarse sin problema.

Dado que el material con el que se van a imprimir las piezas más adelante se trata de un plástico (en concreto, poliestireno de alto impacto), es de vital importancia añadir nervios (adiciones de material de un espesor determinado en una dirección especificada entre el contorno y una pieza existente) en el diseño de las piezas para aumentar su resistencia en las zonas más críticas, que se señalan en cada pieza. Los nervios, al igual que las piezas, están formados por poliestireno de alto impacto para facilitar el proceso de construcción y diseño, aunque se podrían utilizar otros materiales más efectivos. A su vez, se busca que las piezas móviles o que no resistan grandes tensiones sean lo más ligeras posibles con el fin de reducir el material utilizado y el peso del prototipo.

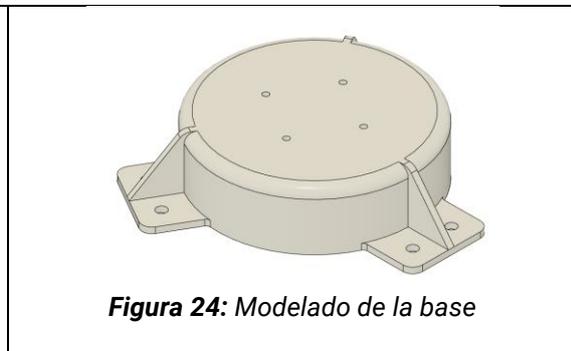
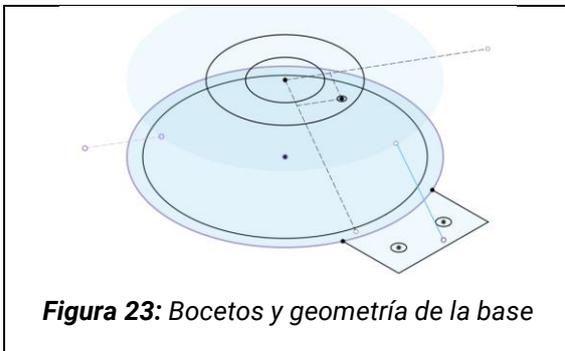
### 2.5.2. Descripción del proceso de modelado

Para realizar el modelado 3D de las piezas, se utiliza el programa Fusion 360. Este programa trabaja inicialmente con bocetos, que se tratan de planos en los cuales se realiza la geometría que define posteriormente la forma del objeto. Una vez se realizan los bocetos y se define completamente las dimensiones del objeto, se realiza una o varias extrusiones que producen un volumen cuya sección equivale a la geometría del boceto. Por último, se añadirían los nervios y se realizarían las modificaciones en el acabado del objeto, en el caso de que fuera necesario.

A continuación, se muestra la versión definitiva de las piezas junto a los bocetos que han definido su geometría en el programa. Además, se describen los problemas que han podido aparecer durante el desarrollo de algunas de las piezas y como se ha llevado a cabo su resolución. Las dimensiones de la geometría de las piezas, así como las especificaciones técnicas que tienen cada una de las piezas se encuentran recogidas en los documentos de Planos y Pliego de Condiciones del proyecto, respectivamente.

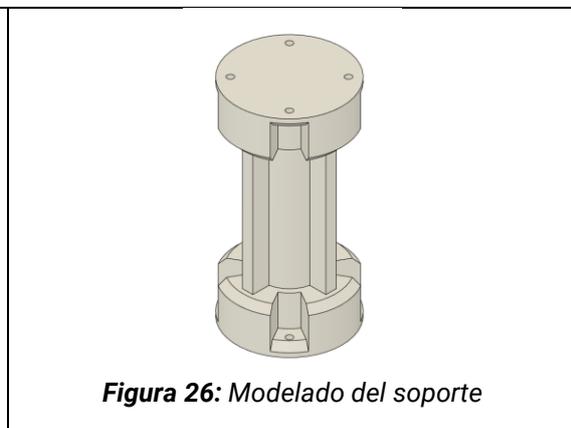
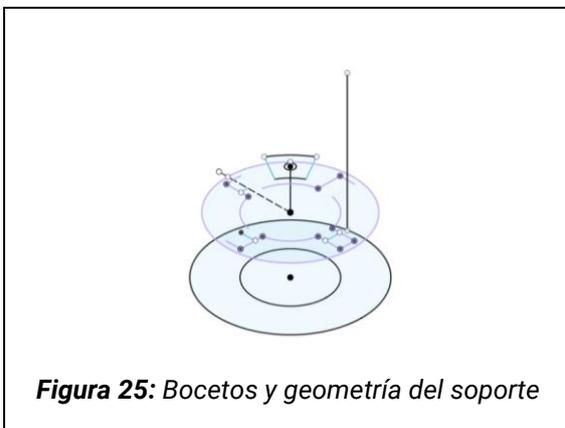
#### 2.5.2.1. Base

Para realizar el modelado de la base, se opta por diseñar una geometría cilíndrica. Además, se añaden 3 extremos reforzados con nervios en la parte inferior para poder atornillar la base del robot a una superficie, de forma que los nervios proporcionen una mayor resistencia en el caso de que se produzcan vibraciones a causa del movimiento del robot. Por último, se realiza un acabado superficial en algunas aristas para reducir el material utilizado y también con una finalidad estética.



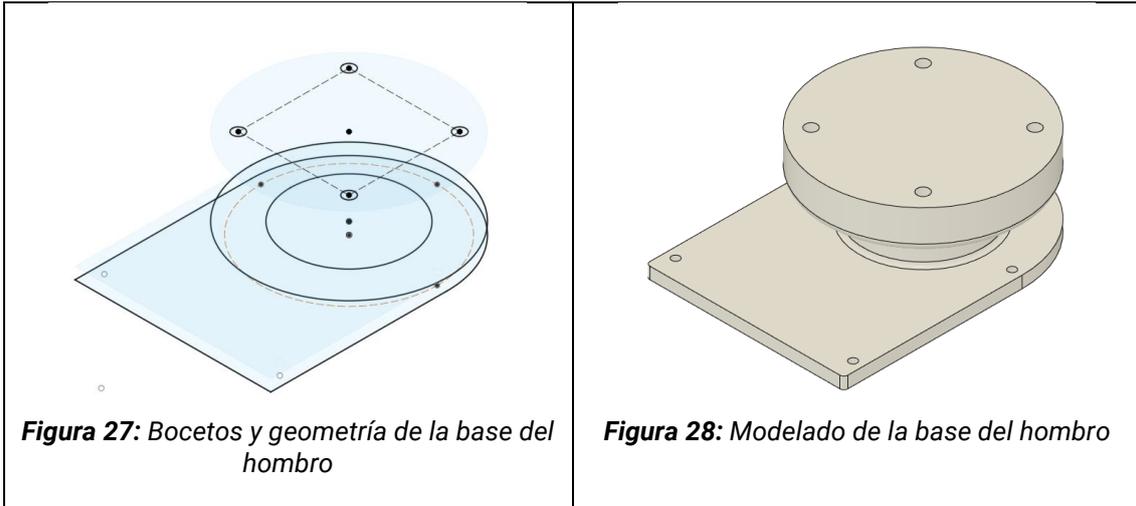
#### 2.5.2.2. Soporte

Para realizar el modelado del soporte, se opta por diseñar una geometría cilíndrica. Se añaden una serie de refuerzos estructurales en ambos extremos (salvo en las zonas donde se va a introducir la tornillería), además de un total de 4 nervios a lo largo de la columna para reforzar la estructura y resistir el peso del robot. Por último, se realiza un acabado superficial en algunas aristas para reducir el material utilizado y también con una finalidad estética.



### 2.5.2.3. Base del hombro

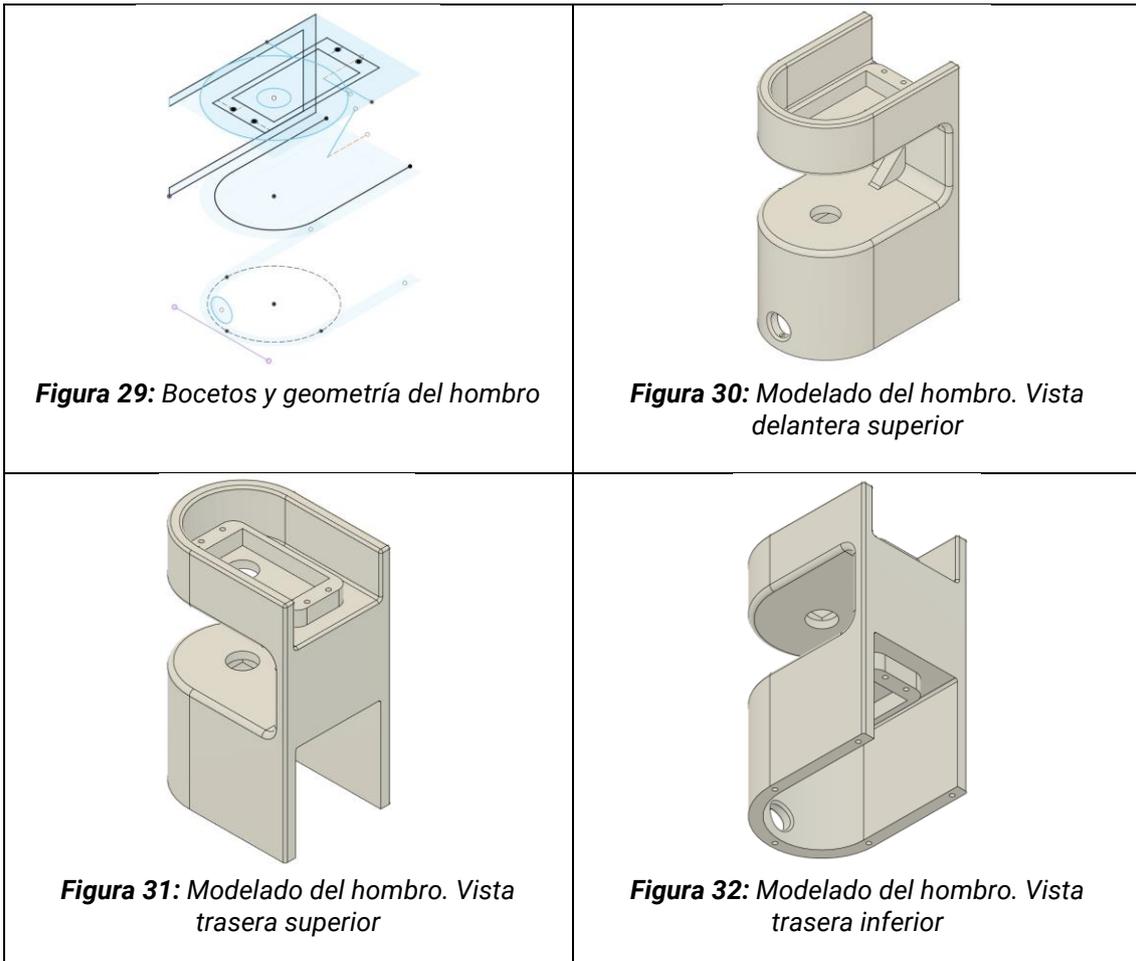
Para realizar el modelado del hombro, se opta por separarlo en 2 piezas, con el fin de facilitar el proceso de impresión y, además de eso, que sea posible introducir el motor inferior y ensamblarlo al hombro. A continuación, se diseña la geometría de la base del hombro a partir de un dos cilindros de distinto tamaño y una plataforma. Además, se realiza una serie de orificios que permiten atornillar esta pieza a las adyacentes. Por último, se realiza un acabado superficial en algunas aristas para reducir el material utilizado y también con una finalidad estética.



### 2.5.2.4. Hombro

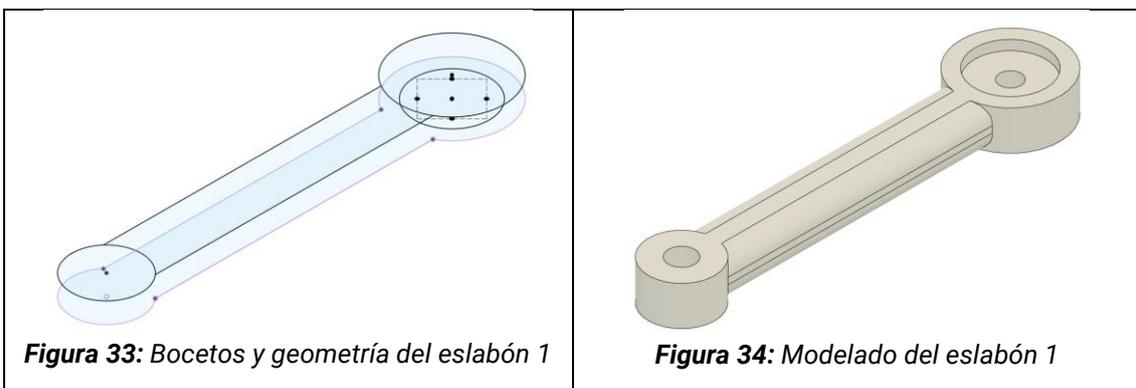
Para realizar el modelado del hombro, se opta por separarlo en 2 piezas, con el fin de facilitar el proceso de impresión y, además de eso, que sea posible introducir el motor inferior y ensamblarlo al hombro.

Una vez seleccionados los motores que se utilizarían en el proyecto, se realiza el diseño del hombro a partir de las dimensiones de estos, generando dos salientes (uno en la parte superior y otro en la parte inferior) y los orificios para los ejes de los servomotores, de tal forma que estos se acoplen perfectamente a la geometría del hombro y puedan ensamblarse sin ningún problema. Además, se realiza un tercer orificio en la parte delantera de la pieza para extraer el cable del servomotor. Por último, se añaden 2 nervios en la pared interior de la pieza para soportar el peso del servomotor superior y de la estructura a la que está ensamblada y se realiza un acabado superficial en algunas aristas para reducir el material utilizado y también con una finalidad estética.



#### 2.5.2.5. Eslabón 1

Para realizar el modelado del eslabón 1, se diseña una geometría compuesta principalmente por una barra rectangular y 2 cilindros, uno a cada extremo de la barra. A su vez, se realizan los 2 orificios principales, encargados de ensamblar la pieza al motor y a la articulación con el eslabón 2. Por último, se realiza un acabado superficial a lo largo de la barra para que exista una mayor continuidad y, por lo tanto, resista mejor las tensiones, además de reducir el material utilizado (junto a las hendiduras de uno de los extremos) y también con una finalidad estética.

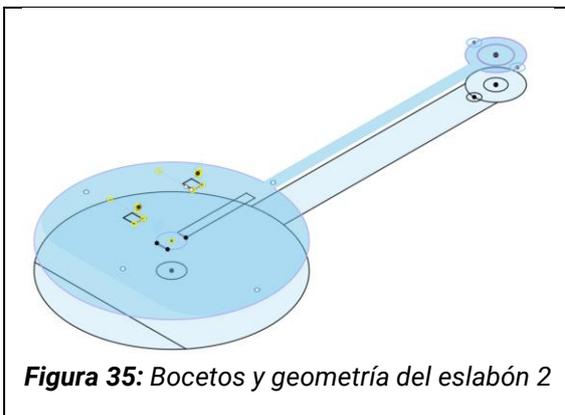


### 2.5.2.6. Eslabón 2

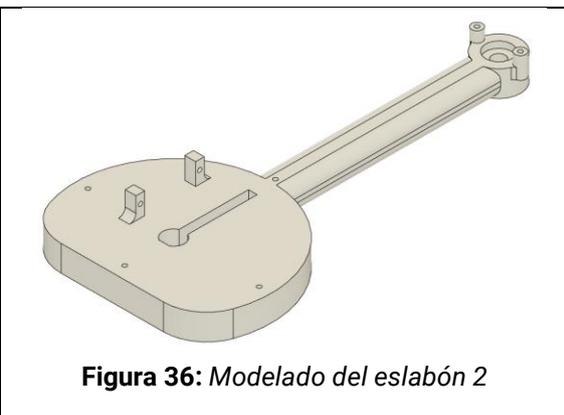
Para realizar el modelado del eslabón 2, se diseña una geometría compuesta principalmente por una barra rectangular, un cilindro en uno de los extremos y, una vez seleccionados los motores que se utilizarían en el proyecto, una plataforma en la que se acopla el servomotor junto al mecanismo que permite el movimiento del eslabón 3, además de una serie de orificios para atornillar el recubrimiento. En el cilindro del extremo se encuentra la articulación con el eslabón 1 y 2 cilindros más pequeños a los que se acoplan las varillas para transmitir el movimiento de uno de los motores.

Es importante explicar que, durante la fase de diseño y modelado de las piezas, ha surgido un problema que ha requerido una modificación de algunas de estas. Como se describe anteriormente, la idea inicial consiste en utilizar una varilla para transmitir el movimiento del motor superior a uno de los eslabones. Tras realizar el ensamblaje de las piezas en el programa para comprobar el funcionamiento, se hizo visible la existencia de una singularidad que no se había tenido en cuenta con anterioridad. Dado que solamente se utilizaría una única varilla para transmitir el movimiento, existiría un punto, justo cuando se encuentra completamente alineada con el eslabón, en el que el eslabón podría realizar un movimiento impredecible. Por eso mismo, se ha optado por utilizar un total de 2 varillas para transmitir el movimiento, modificando, de esta manera, las piezas relacionadas.

Por último, se realiza un acabado superficial a lo largo de la barra para que exista una mayor continuidad y, por lo tanto, resista mejor las tensiones, además de reducir el material utilizado en algunas otras aristas y también con una finalidad estética.



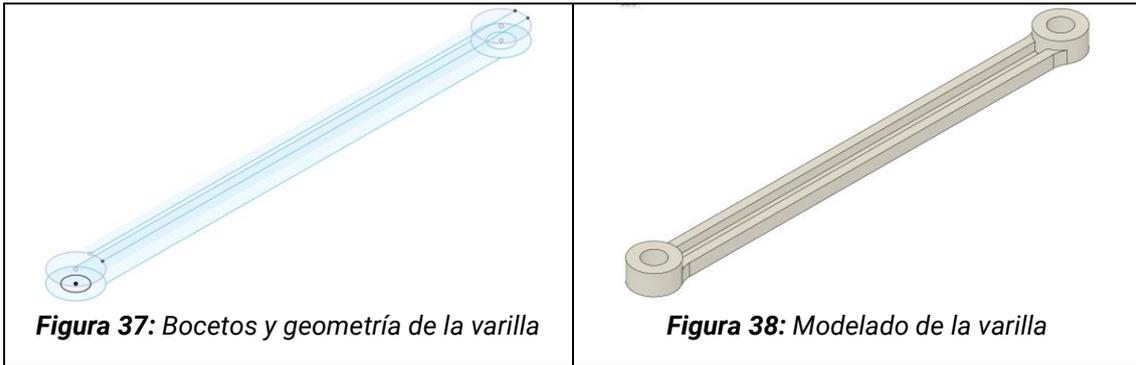
**Figura 35:** Bocetos y geometría del eslabón 2



**Figura 36:** Modelado del eslabón 2

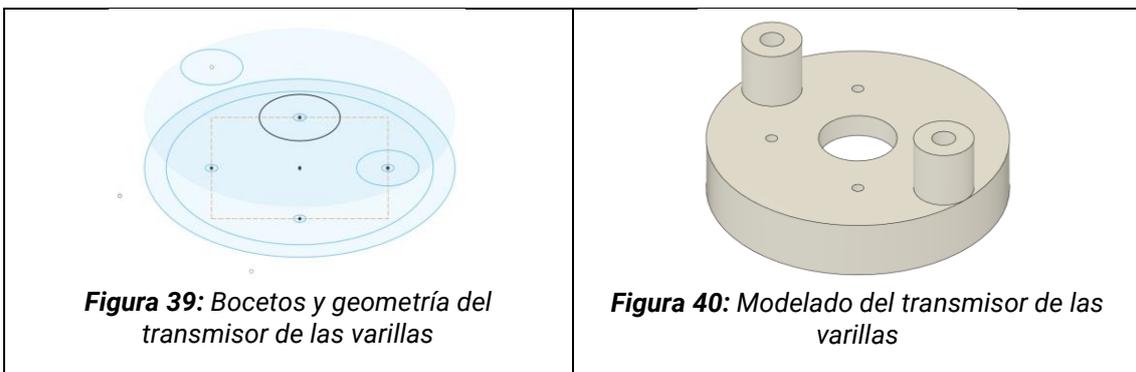
### 2.5.2.7. Varilla

Para realizar el modelado de las varillas, se diseña una geometría compuesta principalmente por una barra rectangular y 2 cilindros, uno a cada extremo de la barra. A su vez, se realizan los 2 orificios para ensamblarlas al eslabón 2 y a la unión varilla-motor. Por último, se realiza un acabado superficial en algunas aristas y se realiza un hueco a lo largo de la barra, con el fin de aligerar su peso reduciendo el material utilizado y también con una finalidad estética.



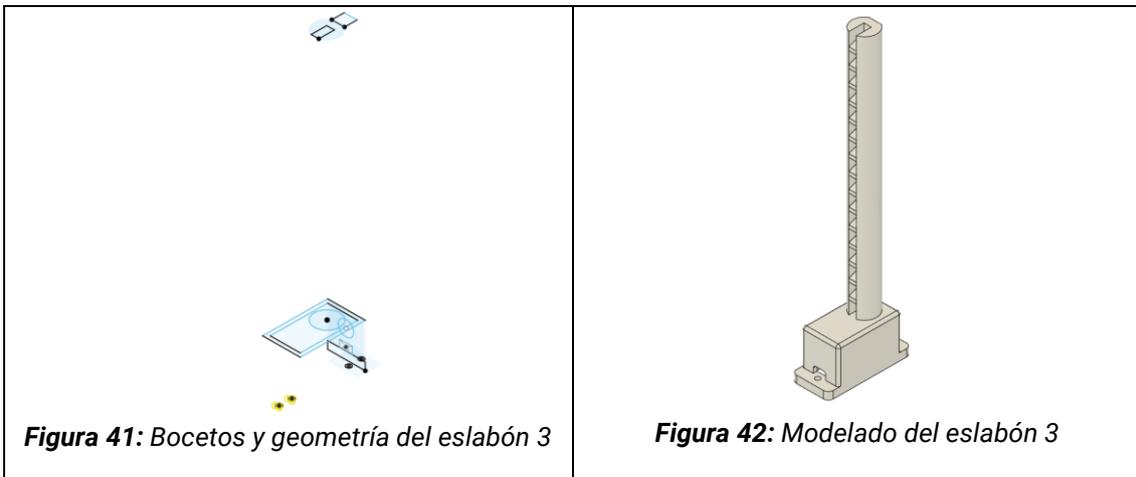
### 2.5.2.8. Transmisor de las varillas

Para realizar el modelado del transmisor de las varillas, se diseña una geometría compuesta principalmente por una un cilindro principal y 2 cilindros de menor tamaño situados en la parte superior. A su vez, se realiza una serie de orificios para ensamblar la pieza al motor y a las varillas.



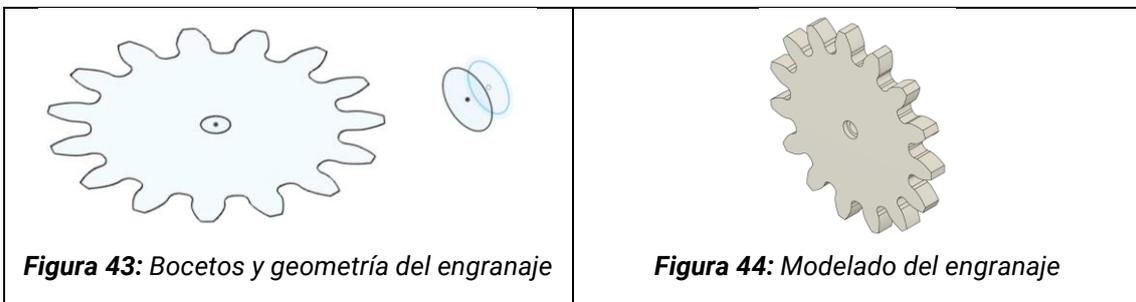
### 2.5.2.9. Eslabón 3

Para realizar el modelado del eslabón 3, se diseña, por un lado, la geometría de la cremallera que forma parte del mecanismo con el engranaje y, por otro lado, la geometría de la estructura principal, formada principalmente por una barra cilíndrica y, una vez seleccionados los motores que se utilizarían en el proyecto, un recubrimiento situado en el extremo inferior en el que se acoplará uno de los servomotores. En cuanto a la geometría de la cremallera, se toma como referencia los datos del engranaje y se ensambla a la ranura de la barra. Por otro lado, una parte de la barra es plana, para evitar que gire alrededor de su eje, y se realiza un orificio en el recubrimiento para extraer el cable del servomotor. Por último, se realiza un acabado superficial en algunas aristas para reducir el material utilizado y también con una finalidad estética.



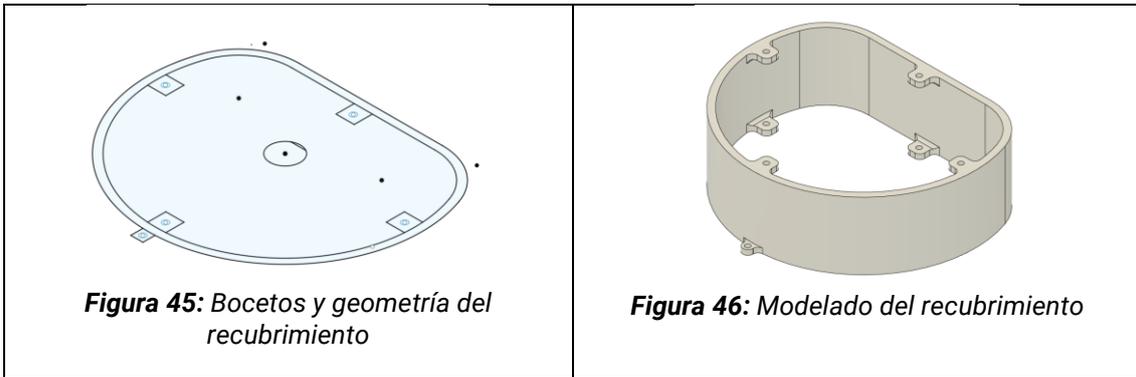
### 2.5.2.10. Engranaje

Para realizar el modelado del engranaje, se utiliza una función de creación de engranajes llamada *FM Gears*, que se puede encontrar dentro del Fusion 360. Se diseña, de esta manera, un engranaje de 15 dientes y módulo 2, al que posteriormente se le añade un cilindro hueco en uno de los lados para poder ensamblarlo a uno de los servomotores, además de un orificio central para el tornillo.



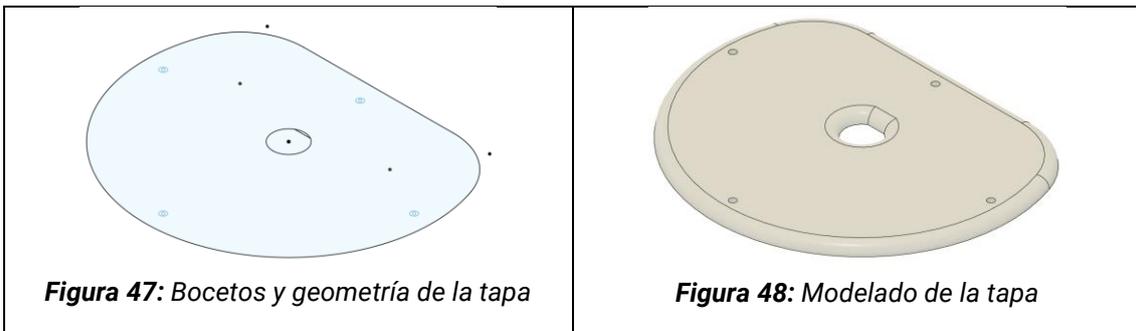
### 2.5.2.11. Recubrimiento

Para realizar el modelado del recubrimiento, se toma como referencia las dimensiones del extremo del eslabón 2 a la hora de llevar a cabo los bocetos para su geometría. Se añaden, además, varios orificios para poder atornillar la pieza. Por último, se realiza un acabado superficial en algunas aristas para reducir el material utilizado y también con una finalidad estética.



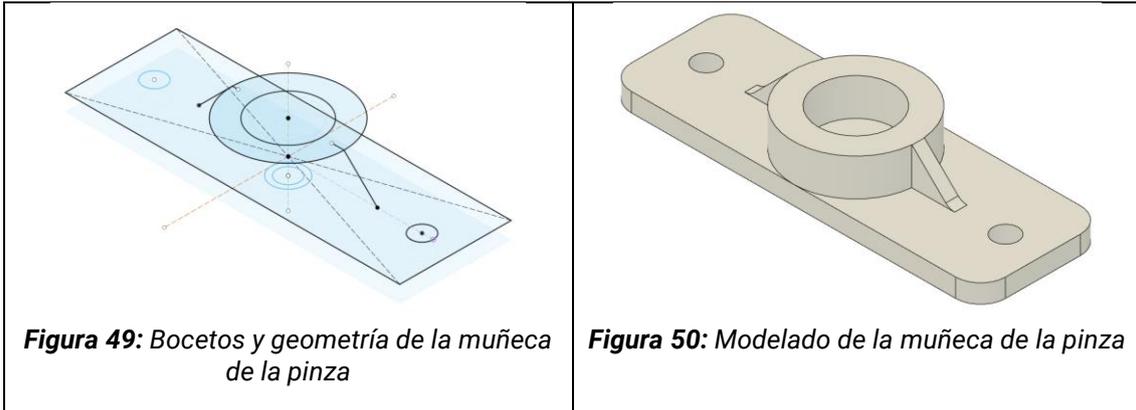
### 2.5.2.12. Tapa

Para realizar el modelado de la tapa, se toma como referencia las dimensiones del extremo del eslabón 2 a la hora de llevar a cabo los bocetos para su geometría. Se añaden, además, varios orificios para poder atornillar la pieza, además del orificio central que permite el paso del eslabón 3. Por último, se realiza un acabado superficial en algunas aristas para reducir el material utilizado y también con una finalidad estética.



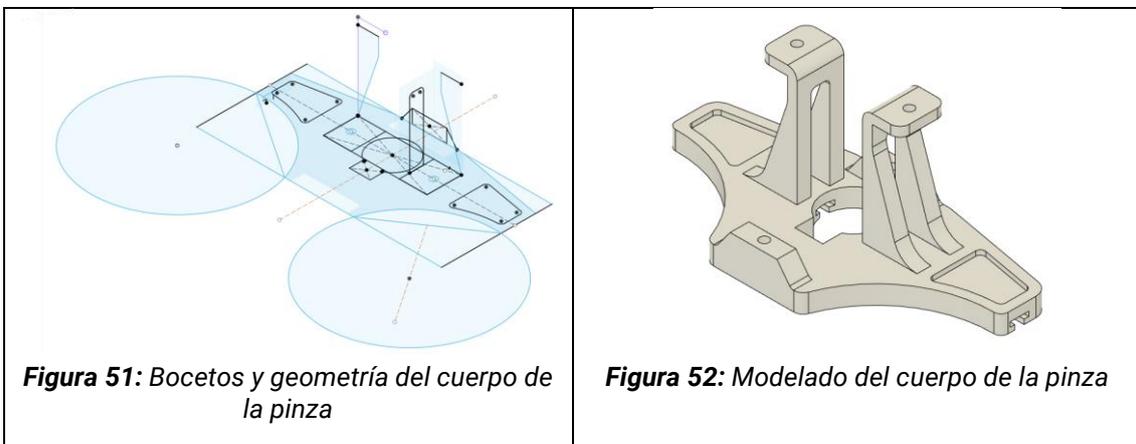
### 2.5.2.13. Muñeca de la pinza

Para realizar el modelado de la muñeca de la pinza, se diseña una geometría compuesta principalmente por un rectángulo y un cilindro hueco. La parte rectangular tiene dos orificios que permite atornillar la pieza al resto de la pinza. A su vez, la parte cilíndrica, junto a un orificio central, permite su acoplamiento al eje del servomotor. Por último, se añaden los dos nervios en la unión entre el cilindro y la plataforma, al ser una zona concentradora de tensiones, y se realiza un acabado superficial en algunas aristas para reducir el material utilizado y también con una finalidad estética.



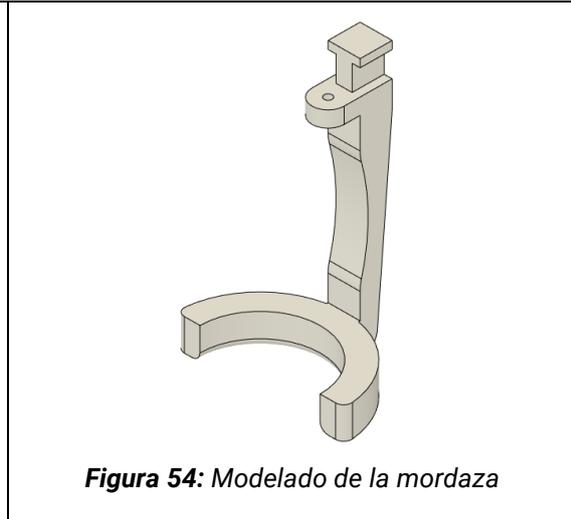
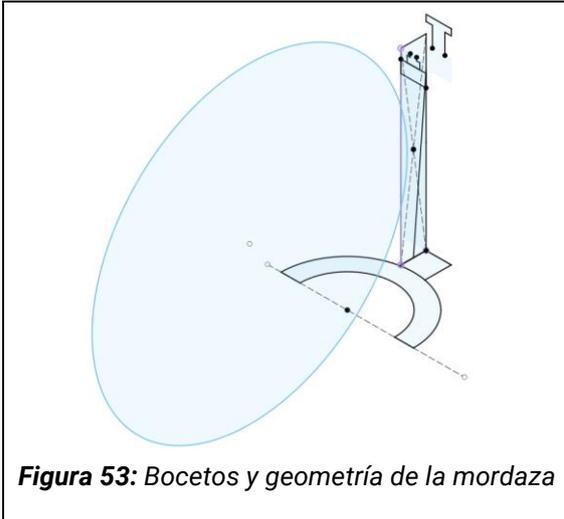
### 2.5.2.14. Cuerpo de la pinza

Para realizar el modelado del cuerpo de la pinza y una vez seleccionados los motores que se utilizarían en el proyecto, se diseña la geometría de la base de la pieza, donde se acoplará uno de los motores, utilizando una elevada cantidad de curvas con la finalidad de utilizar el mínimo material posible y aligerar la pieza. Además, se añaden 2 salientes para poder ensamblar la pieza con la muñeca de la pinza y, eliminando material en la parte inferior, se forman 2 ranuras para ensamblar las mordazas. Por último, se elimina material en los dos extremos y se realiza un acabado superficial en algunas aristas para reducir el material utilizado y también con una finalidad estética.



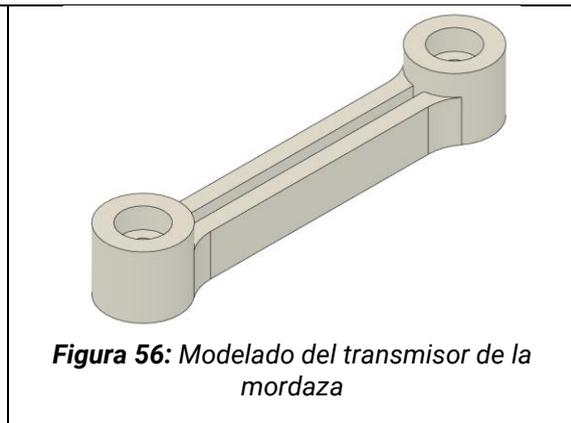
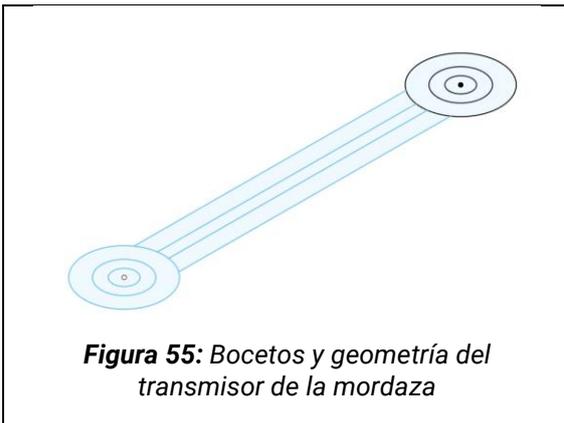
### 2.5.2.15. Mordaza

Para realizar el modelado de las mordazas, se diseña una geometría compuesta principalmente por una barra rectangular y medio cilindro hueco. Además, se añade un orificio para unir las piezas con los transmisores de las mordazas y se añade un extremo con la misma geometría que la ranura del cuerpo de la pinza para que permita su acoplamiento. Por último, se realiza un acabado superficial en algunas aristas para reducir el material utilizado y también con una finalidad estética.



### 2.5.2.16. Transmisor de la mordaza

Para realizar el modelado de los transmisores de las mordazas se lleva a cabo el mismo procedimiento que con las varillas.



## 2.6. ENSAMBLAJE EN FUSION 360

### 2.6.1. Presentación

Una vez diseñadas y modeladas las piezas que componen el robot, se realiza el ensamblaje del robot dentro del propio programa, de forma que se compruebe que la geometría elegida para las piezas es la adecuada. Además, se pueden conocer las dimensiones principales del robot para, posteriormente, realizar el análisis cinemático del prototipo. En cuanto a los modelados 3D de los servomotores, se han obtenido a través de una plataforma gratuita de archivos CAD llamada GrabCAD.

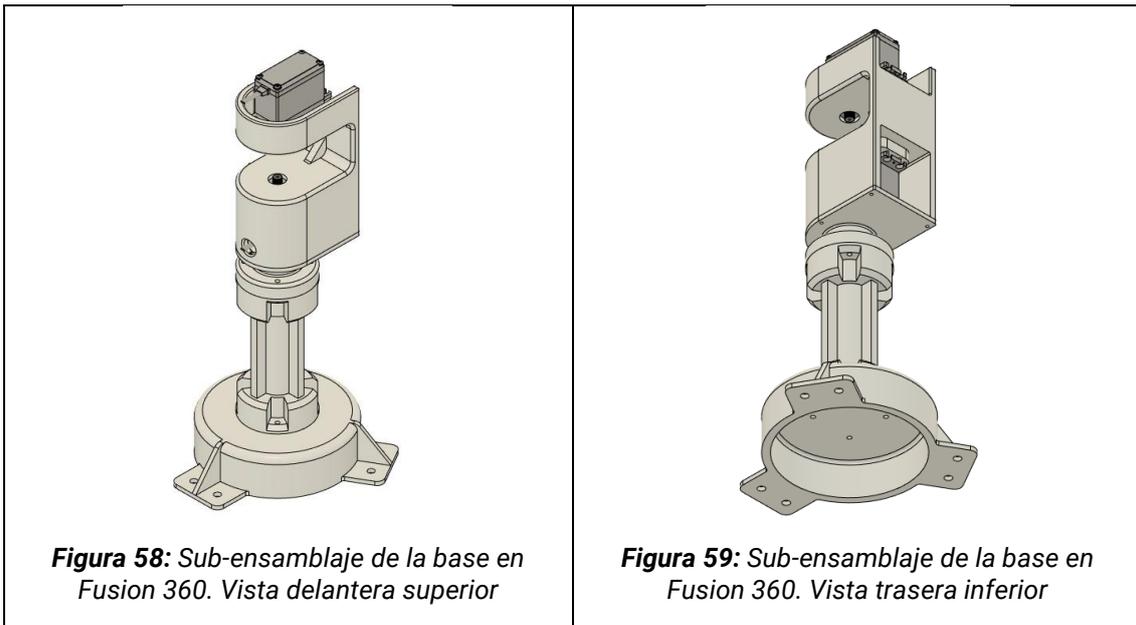
GRABCAD

*Figura 57: Logotipo de GrabCAD*

A continuación, se describen los 3 sub-ensamblajes que forman el robot, además de las uniones que se han llevado a cabo para ensamblar las piezas. Por último, se muestra el ensamblaje final del robot.

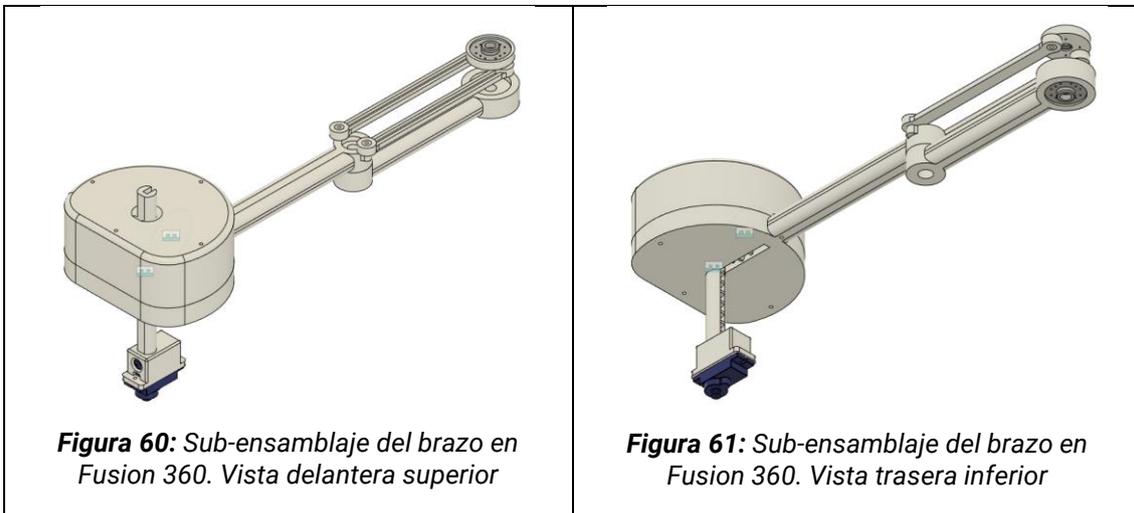
### 2.6.2. Sub-ensamblaje de la base

Está formado por la base, el soporte, la base del hombro, el hombro y 2 servomotores MG996R. Todas las uniones que forman parte del sub-ensamblaje son fijas.



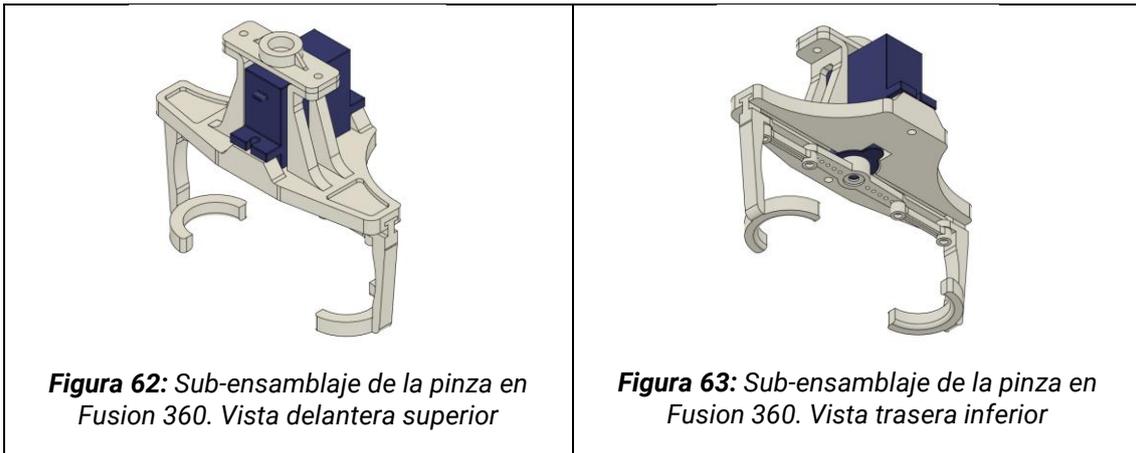
### 2.6.3. Sub-ensamblaje del brazo

Está formado por el eslabón 1, el eslabón 2, el eslabón 3, las 2 varillas, el transmisor de las varillas, el engranaje, el recubrimiento, la tapa y 2 servomotores SG90, además de los extremos de los ejes de los servomotores MG996R. Los extremos de los motores se ensamblan al eslabón 1 y al transmisor de las varillas a través de una unión rígida, así como los servomotores a los eslabones 2 y 3. A su vez, se realiza una unión prismática entre el eslabón 3 y el eslabón 2, permitiendo únicamente un desplazamiento vertical. Por otro lado, se realizan uniones de revolución entre el eslabón 1 con el eslabón 2, las varillas con el eslabón 2 y con el transmisor de las varillas y el engranaje con el servomotor. Por último, para representar el mecanismo de cremallera en el programa, se emplea un vínculo de movimiento entre la unión de revolución del engranaje y la unión prismática del eslabón 3, especificando su movimiento a partir de la relación entre los dientes.



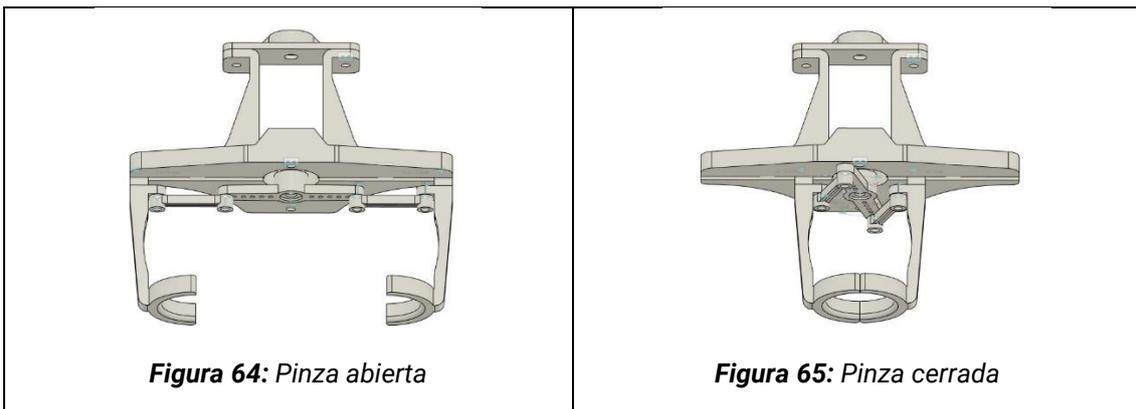
### 2.6.4. Sub-ensamblaje de la pinza

Está formado por la muñeca de la pinza, el cuerpo de la pinza, las 2 mordazas, los 2 transmisores de las mordazas y un servomotor SG90 junto con su extremo adherible. Se utilizan uniones rígidas para ensamblar el cuerpo de la pinza con el servomotor, así como con la muñeca de la pinza. A su vez, se realizan uniones prismáticas entre las mordazas y el cuerpo de la pinza para representar su desplazamiento a lo largo de la ranura. Por otro lado, se realizan uniones de revolución entre el extremo del servomotor con el servomotor, así como con los transmisores de las mordazas, y entre los transmisores con las mordazas.



#### 2.6.4.1. Funcionamiento de la pinza

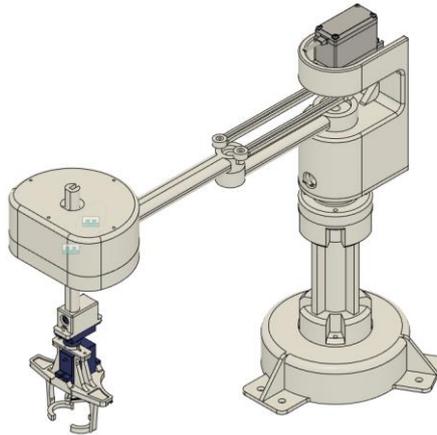
Al girar el eje del motor, se transmite el movimiento a las pinzas gracias a los transmisores, y se desplazan linealmente. A continuación, en las **Figuras 64 y 65** se muestra la pinza cuando se encuentra abierta y cerrada:



De esta manera, se puede apreciar la relación de los componentes a la hora de producir el desplazamiento de las mordazas.

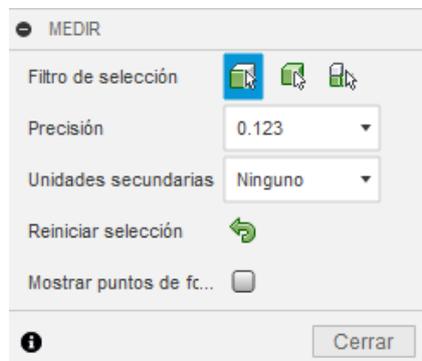
#### 2.6.5. Ensamblaje final

Una vez realizados los ensamblajes anteriores, se crea un último archivo en el que se ensamblan, dando lugar al robot final. Para completar el ensamblaje, se crea un total de 3 uniones de revolución: la primera entre el eslabón 1 y el hombro, la segunda entre el transmisor de las varillas y el hombro, y la tercera entre la muñeca de la pinza y el servomotor del eslabón 3. De esta forma, se obtiene finalmente el ensamblaje del robot SCARA. A continuación, se muestra el ensamblaje al completo:



**Figura 66:** Ensamblaje del robot SCARA

Una vez realizado el ensamblaje, es posible conocer las dimensiones entre las distintas partes que conforman el robot gracias a la herramienta “medir”, que se muestra en la **Figura 67**, y que permite conocer varios parámetros y dimensiones que son importantes a la hora de realizar el análisis cinemático, como la distancia entre 2 paredes o lados, el ángulo que forman, el diámetro de una circunferencia, etc.



**Figura 67:** Ventana emergente de la herramienta “medir”

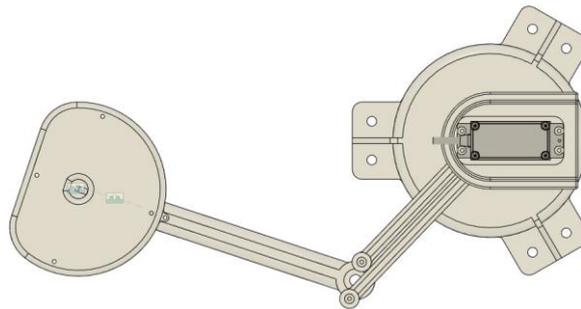
Las dimensiones generales del ensamblaje del robot SCARA se encuentran recogidas en el plano con el mismo nombre del documento Planos del proyecto.

## 2.7. RANGO ARTICULAR DEL ROBOT

Una vez realizado el ensamblaje, es posible conocer cuál es el rango articular de cada uno de los eslabones. Un factor que limita notablemente el rango articular es la existencia de las varillas, que lo reducen dado que llegaría un punto en el que colisionarían entre ellas, dificultando los desplazamientos del brazo que requieran un elevado rango de giro. Además, el rango de giro útil de los servomotores MG996R es, en este caso, de 180 grados, por lo que no puede realizarse una trayectoria que requiera un giro mayor.

Teniendo esto en cuenta, se parte de una posición de reposo en la cual el brazo se encuentra completamente recto y paralelo a las paredes laterales del hombro, además de encontrarse el eslabón 3 completamente subido, y se realizan las mediciones necesarias para conocer el rango de desplazamiento de las articulaciones. Dado que la pinza puede girar 360 grados con respecto al eje del eslabón 3, no se tiene en cuenta a la hora de definir el rango articular.

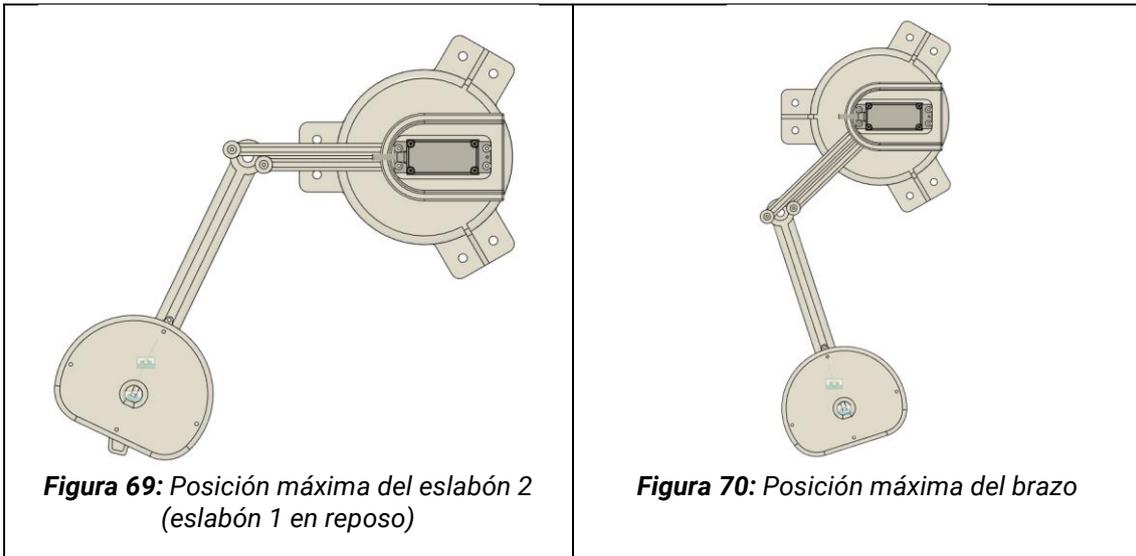
En primer lugar, se gira el eslabón 1 hasta alcanzar la posición máxima, como se muestra en la **Figura 68**:



**Figura 68:** Posición máxima del eslabón 1

Utilizando la herramienta descrita anteriormente, se mide el ángulo formado entre el eslabón 1 y la pared lateral del hombro, obteniendo un ángulo de, aproximadamente, 135 grados (45 grados con respecto a la posición de reposo). Reduciendo un poco el rango máximo para tener un margen de seguridad y considerando el giro del eslabón hacia la izquierda y hacia la derecha, se fija el rango de giro del eslabón 1 entre -40 y 40 grados.

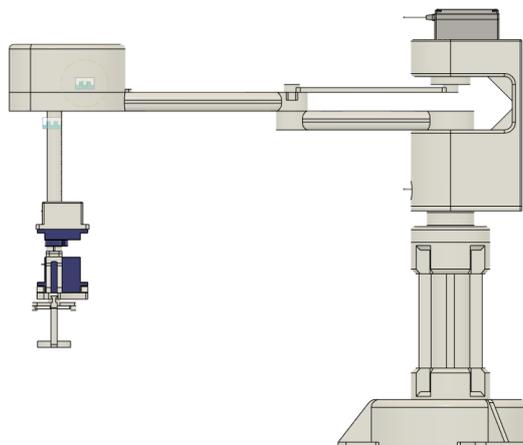
En segundo lugar, se gira el eslabón 2 hasta alcanzar la posición máxima. Se contemplan 2 situaciones, una en la que el eslabón 1 permanezca en la posición de reposo, y otra en la que el eslabón 1 se encuentre en la posición máxima, como se muestran en la **Figuras 69 y 70**:



El ángulo que se obtiene con respecto al eslabón 1 es de, aproximadamente 115 grados (65 grados con respecto a la posición de reposo). Reduciendo un poco el rango máximo para tener un margen de seguridad y considerando el giro del eslabón hacia la izquierda y hacia la derecha, se fija el rango de giro del eslabón 2 entre -60 y 60 grados, y el rango de giro del brazo resultaría en la suma de los dos eslabones, pudiendo alcanzar un rango máximo entre -100 y 100 grados.

Es posible aumentar el rango articular del brazo intercalando varios movimientos de los eslabones para evitar la colisión de las varillas, pero resultaría dificultoso y lento llevarlo a cabo, por lo que se descarta esa opción.

Por último, se baja el eslabón 3 hasta que el extremo superior se encuentre a la misma altura que la tapa, de forma que no se llegue a salir del orificio de la tapa y evitando así que se produzca algún fallo en la trayectoria del eslabón, como se muestra en la **Figura 71**:



**Figura 71:** Posición máxima del eslabón 3

## Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

La distancia que se obtiene con respecto al eslabón 2 es de, aproximadamente, 58mm. Reduciendo un poco el rango máximo para tener un margen de seguridad, se fija el desplazamiento del eslabón 3 entre 0 y 55mm.

Además, tomando como referencia el centro de la parte inferior de la base, se puede obtener la distancia mínima y máxima del brazo con respecto a la referencia, además de la altura máxima y mínima que puede alcanzar el eslabón 3 del mismo modo. De esta forma, se obtiene una distancia de trabajo máxima del brazo con respecto a la referencia de 250mm (cuando está completamente estirado) y una distancia mínima de 215mm (cuando los eslabones se encuentran completamente flexionados). Además, se obtiene una altura máxima de la pinza de 120mm, y una altura mínima de 70mm, que coincide con la altura mínima que puede alcanzar la pinza para coger un objeto.

Por último, se recogen los resultados obtenidos anteriormente en la **Tabla 1**, que se muestra a continuación:

	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 3	Brazo
Rango articular (mín. y máx.)	-40/+40°	-60/+60°	0/55mm	-100/+100°
Distancia (mín. y máx.)	-	-	70/120mm	215/250mm

**Tabla 1:** Rango articular y distancia del robot

## 2.8. ANÁLISIS CINEMÁTICO

### 2.8.1. Presentación

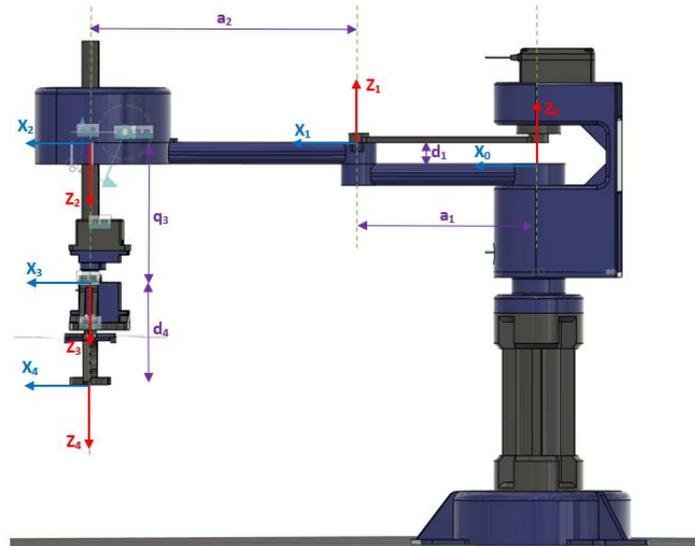
En este apartado del proyecto, se realizan los cálculos necesarios para resolver el problema cinemático del robot SCARA obtenido. Dichos cálculos se han explicado anteriormente de forma teórica en el apartado Marco Teórico del documento Memoria del proyecto.

En primer lugar, se elige la posición en la que se encuentre el robot para realizar el análisis cinemático, en este caso, la posición de reposo. Decidida la posición, se resuelve la tabla D-H y se obtienen los parámetros necesarios para obtener las matrices de paso y, con ellas, obtener la matriz transformada del robot para resolver la cinemática directa. Para verificar la cinemática directa, se emplea el programa Robotscene, que permite obtener la posición de los elementos que conforman el robot a partir de los parámetros de la tabla D-H.

En segundo lugar, se lleva a cabo la resolución de la cinemática inversa. A partir de la posición elegida anteriormente, se obtienen los parámetros de las coordenadas articulares del robot. Para comprobar que el resultado obtenido es el correcto, las coordenadas articulares obtenidas en la resolución de la cinemática inversa deben coincidir con las elegidas en la cinemática directa.

### 2.8.2. Cinemática directa

Para resolver el problema cinemático directo, es necesario seguir el procedimiento descrito en el Marco teórico. Siguiendo las reglas, se numeran y se sitúan los sistemas de referencia y los ejes en el robot, además de señalar los parámetros de desplazamiento de los ejes. De esta forma, se obtiene el siguiente resultado:



**Figura 72:** Parámetros de cinemática directa del robot

Como se puede apreciar en la imagen, dado que el robot consta de 4 grados de libertad, es necesaria la misma cantidad de transformaciones para llevar a cabo la cinemática directa del robot.

Una vez situados los sistemas de referencia, se miden las distancias necesarias del robot y se rellena la tabla D-H:

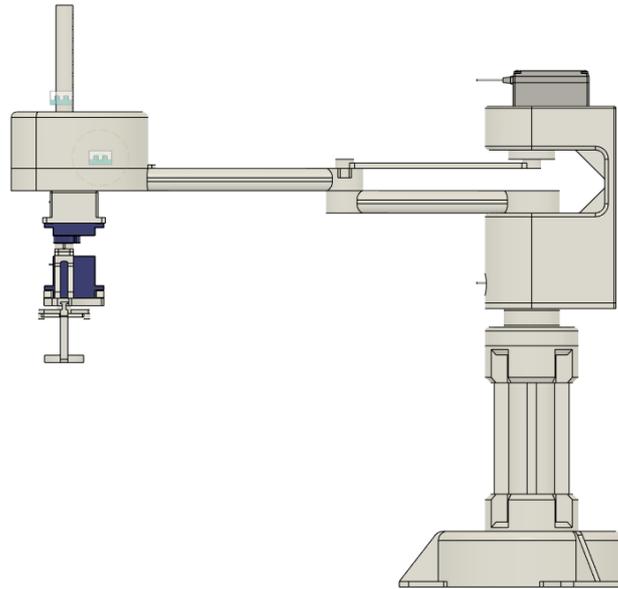
	$\theta$	d	a	$\alpha$
0-1	$q_1$	12	100	0
1-2	$q_2$	0	150	180
2-3	0	$q_3$	0	0
3-4	$q_4$	59.7	0	0

**Tabla 2:** Tabla Denavit-Hartenberg del robot

Como se puede apreciar, existe una serie de variables denominadas coordenadas articulares, que determinan los parámetros de giro y desplazamiento de las articulaciones del robot. Para resolver la cinemática directa, es necesario proporcionarles un valor a las coordenadas articulares eligiendo la posición que se

## Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

desea que tenga el robot. En este caso, se elige la posición de reposo, como se muestra en la figura X:



**Figura 73:** Posición de reposo del robot

En este caso, el brazo se encuentra completamente estirado y la pinza está recogida. Por lo tanto, las coordenadas articulares en la posición de reposo tienen el siguiente valor:

$(q_1, q_2, q_3, q_4) = (0, 0, 44.9, 0)$ , siendo  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_4$  en grados y  $q_3$  en milímetros.

Una vez definida la posición, se calcula la matriz  ${}^0T_4$ , que contiene las coordenadas operacionales del robot en dicha posición. Los cálculos realizados para obtener las matrices de paso necesarias, así como la matriz final, se encuentran recogidos en el **Anexo 2** de este documento.

Una vez resueltas las matrices de paso, se obtiene la  ${}^0T_4$  (en mm), mostrada a continuación:

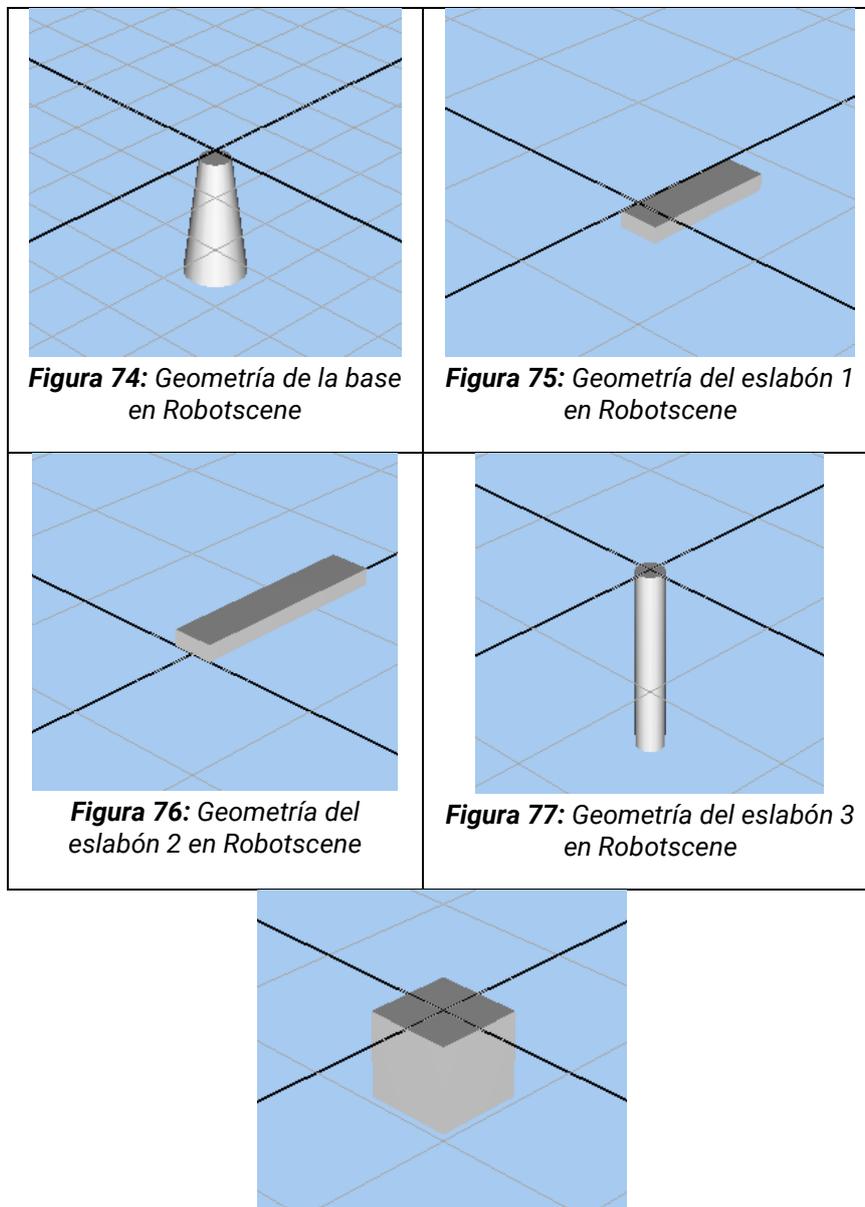
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 250 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -92.6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Resolviendo, de esta manera, el problema cinemático directo.

2.8.2.1. Verificación de la cinemática directa en Robotscene

A partir del programa mencionado, se verifica que las transformaciones realizadas en la tabla D-H sean las correctas, así como las coordenadas articulares que definen la posición de reposo.

En primer lugar, deben crearse los eslabones y elementos que forman parte del robot y que participan en el problema cinemático directo a través del constructor de objetos. Además, deben situarse con respecto al sistema de referencia a la misma distancia que a la que se encuentran con los sistemas de coordenadas situados en el esquema de cinemática directa. Para simplificar el proceso, basta con realizar elementos simples que tengan las mismas dimensiones generales que los eslabones originales. A continuación, se muestran los objetos que se han realizado para la construcción del robot:



**Figura 74:** Geometría de la base en Robotscene

**Figura 75:** Geometría del eslabón 1 en Robotscene

**Figura 76:** Geometría del eslabón 2 en Robotscene

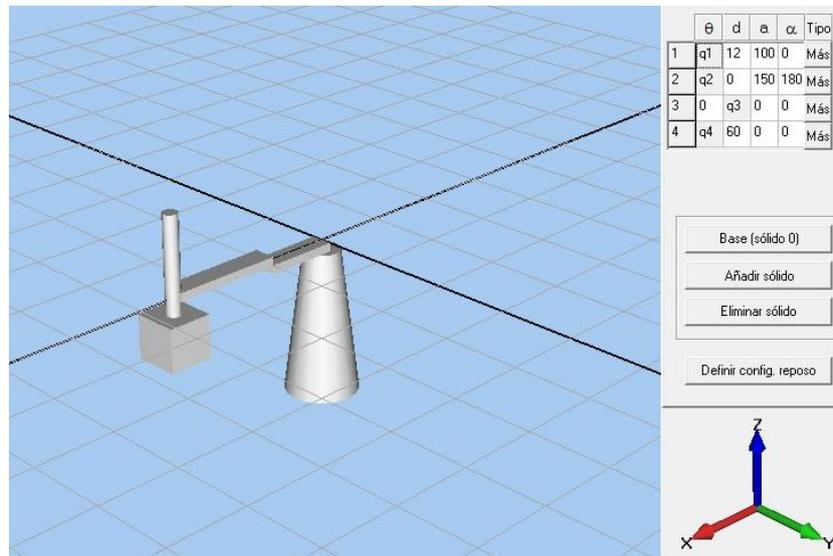
**Figura 77:** Geometría del eslabón 3 en Robotscene

**Figura 78:** Geometría de la pinza en Robotscene

## Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

Una vez construidos los elementos que conforman el robot, se ejecuta el constructor de robots para colocarlos correctamente. Se deben importar los cuerpos con el mismo orden que sigue la tabla D-H, al mismo tiempo que se especifica el tipo de articulación (de rotación o prismática) y se completa los datos de la tabla correspondientes.

Una vez completa la tabla, se comprueba que la disposición de los elementos del robot es la correcta, tal y como aparece en la **Figura 79**, y se verifica el problema cinemático directo.

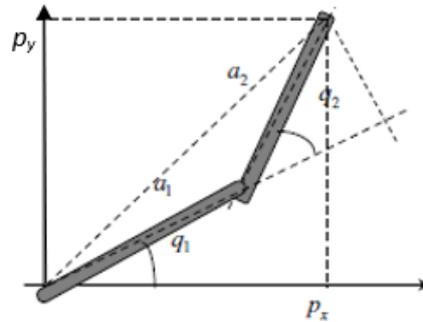


**Figura 79:** Robot obtenido en Robotscene y tabla D-H correspondiente

### 2.8.3. Cinemática inversa

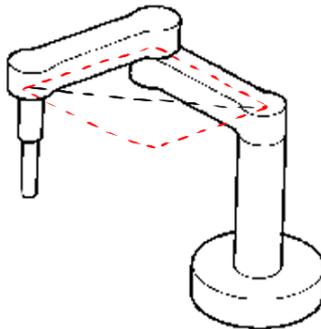
Una vez resuelta la cinemática directa, el siguiente paso es resolver el problema cinemático inverso. Para ello, se parte de las coordenadas operacionales del robot, obteniendo como resultado las coordenadas articulares de cada uno de los eslabones. Realizando la cinemática inversa del robot, se puede comprobar que el robot sea capaz de alcanzar una determinada posición de trabajo si las coordenadas articulares que se obtienen como resultado coinciden con las elegidas en la cinemática directa.

Dado que se trata de un robot tipo SCARA y solo tiene 4 grados de libertad, se va a emplear el método geométrico para resolver el problema cinemático inverso, de forma que se obtengan las coordenadas articulares pertenecientes al brazo, es decir,  $q_1$  y  $q_2$ , a partir de relaciones trigonométricas en el plano XY, como se muestra en la **Figura 80**:



**Figura 80:** Representación trigonométrica del brazo

En la mayoría de las situaciones, el robot puede realizar varios movimientos diferentes para llegar a la misma posición, por lo que deben tenerse en cuenta a la hora de resolver el problema cinemático inverso. En el caso del robot SCARA, pueden existir dos posibles posiciones del brazo para alcanzar un mismo punto (codo izquierda y codo derecha), por lo que se obtendrían dos resultados posibles para las coordenadas articulares del brazo, como se muestra en la **Figura 81**:



**Figura 81:** Posibles configuraciones del brazo (rojo)

Sin embargo, en el caso planteado la situación es diferente. Dado que el robot se encuentra en la posición de reposo, que coincide con la distancia máxima que puede alcanzar el brazo, solamente existe una única posición, por lo que las coordenadas articulares tendrían una sola solución.

Además, la hora de resolver el problema cinemático inverso en un robot SCARA, no se tienen en cuenta los parámetros  $q_3$  y  $q_4$ , dado que son resultados en sí mismos y son independientes del resto de parámetros. En adición, la posición de la pinza en reposo, que depende también de la coordenada articular  $q_3$ , coincide con el parámetro 3-4 de la matriz  ${}^0T_4$ , que tiene el valor de  $-94.6\text{mm}$ , por lo que es posible despejar el valor de  $q_3$ . Por otro lado, el parámetro  $q_4$  que describe el giro de la pinza simplemente sería de  $0$  grados, al encontrarse en la posición de reposo. Por tanto, se tienen hasta el momento los siguientes resultados:

$$12 - q_3 - 59.7 = -92.6 \rightarrow q_3 = 44.9mm$$

$$q_4 = 0^\circ$$

A continuación, se calculan los parámetros  $q_1$  y  $q_2$ . Tomando como referencia la representación de la **Figura 80**, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$p_x^2 + p_y^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos q_2 \rightarrow \begin{cases} q_2 = \pm \cos^{-1} \frac{p_x^2 + p_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \\ q_1 = \tan^{-1} \frac{p_x}{p_y} - \tan^{-1} \frac{a_2 \sin q_2}{a_1 + a_2 \cos q_2} \end{cases}$$

Siendo  $a_1 = 100mm$ ;  $a_2 = 150mm$ ;  $p_x = 0mm$ ;  $p_y = 250mm$  (condición de reposo)

Por lo tanto, sustituyendo los datos y resolviendo las ecuaciones, se obtiene que:

$$q_2 = 0^\circ \rightarrow q_1 = 0^\circ$$

Por tanto, se puede corroborar que el análisis cinemático inverso es correcto, ya que las coordenadas articulares obtenidas coinciden con las coordenadas articulares seleccionadas durante el análisis cinemático directo y, por tanto, la configuración propuesta se puede llevar a cabo correctamente. Por consiguiente, se verifica la cinemática del prototipo en su totalidad.

## 2.9. IMPRESIÓN Y MONTAJE DEL ROBOT

### 2.9.1. Presentación

Durante esta parte del proyecto, se muestra el procedimiento que se ha seguido desde la preparación de los archivos de las piezas para su impresión hasta el montaje completo del robot. Se detallan, además, los ajustes que han tenido que realizarse en algunas piezas para su correcto ensamblaje, junto con su reimpresión. Además, se explica el proceso de montaje del robot junto con los problemas que han aparecido durante esta fase. La descripción detallada del procedimiento que tiene que seguirse para realizar el montaje completo del robot se encuentra en el apartado 3.1 del documento **Pliego de Condiciones** de este proyecto.

### 2.9.2. Proceso de impresión

Las piezas modeladas anteriormente han sido impresas de forma gratuita a través de las impresoras 3D de la propia universidad y con la ayuda de los técnicos responsables. Para ello, se exportan los archivos de las piezas en formato IGES, debido a que en ese formato resulta más sencillo para los técnicos realizar las modificaciones que sean necesarias para imprimir las piezas. Una vez se tienen todos los archivos, se comprimen en un fichero RAR junto con un archivo Excel que recoge la cantidad que se desea imprimir de cada una de las piezas.

El material utilizado para la fabricación de las piezas se trata de poliestireno de alto impacto (un polímero de adición constituido por unidades repetidas de estireno y butadieno), en concreto, un filamento de impresión 3D conocido como Z-HIPS. Este material, como su nombre indica, posee una gran resistencia a impactos en comparación a otros polímeros. Este tipo de poliestireno tiene una densidad de aproximadamente  $1.05\text{g/cm}^3$  a  $73^\circ\text{F}$  (aproximadamente  $23^\circ\text{C}$ ), lo que lo convierte en un material muy ligero y resistente ideal para la construcción de prototipado.

Una vez impresas las piezas, se comprueba que tengan las dimensiones correctas y comienza el montaje del robot.

### 2.9.3. Rediseño de piezas

Tras la primera impresión de las piezas, debido a la tolerancia de la impresora e incluso a pequeños errores métricos, algunas de estas no han cumplido con las condiciones exigidas para su correcto ensamblaje, por lo que ha sido necesario redimensionar algunas de sus partes y volver a imprimirlas. En el documento Planos del proyecto se muestran las dimensiones finales de las piezas descritas a continuación.

En primer lugar, se ha realizado el rediseño del eslabón 3, debido a que las dimensiones del extremo inferior no permitían el acoplamiento correcto del servomotor y se produjo una rotura, por lo que se han aumentado las dimensiones de dicho extremo.

En segundo lugar, se ha realizado el rediseño del engranaje, debido a que tenía un grosor excesivo y no encajaba correctamente con la cremallera del eslabón 3, por lo que se ha reducido el grosor de la parte dentada.

Por último, se ha realizado el rediseño tanto del cuerpo de la pinza como de las mordazas, debido a que el extremo de las mordazas no encajaba correctamente con la ranura del cuerpo de la pinza, por lo que se han aumentado levemente las dimensiones de la ranura y se han reajustado las dimensiones del extremo de las mordazas.

#### 2.9.4. Montaje del robot

Una vez realizados los ajustes necesarios y comprobar que las piezas encajan correctamente entre ellas, así como realizar el lijado de estas y eliminar el material de impresión excesivo, se procede al montaje del robot.

En primer lugar, se realiza el ensamblaje de la base, el soporte y la base del hombro, obteniendo el resultado que se muestra en la **Figura 82**:



**Figura 82:** Montaje de la base, el soporte y la base del hombro

Tras el montaje mostrado anteriormente, se produjo de forma accidental la caída de este, generando una rotura en la superficie en voladizo de la base del hombro. Afortunadamente, ha podido solucionarse correctamente el problema con la ayuda de un adhesivo. No obstante, una posible mejora de la base del hombro podría ser la implementación de un nervio en la parte inferior que refuerce la parte en voladizo de la pieza.

Una vez finalizado el sub-ensamblaje de la base, se realiza el montaje del brazo. A continuación, se puede apreciar la evolución del montaje del brazo junto a su ensamblaje a la base:



**Figura 83:** Montaje del eslabón 1 y el eslabón 2



**Figura 84:** Montaje del eslabón 2, el eslabón 3, el engranaje y 2 servomotores SG90



**Figura 85:** Ensamblaje de la base y el brazo

Debido a que no se tuvo en cuenta el cable del servomotor SG90 a la hora de diseñar el recubrimiento, se ha optado por realizar una muesca en esta pieza con la ayuda de una lima circular, permitiendo de esta forma el paso del cable del servomotor.

Además, el propio peso del brazo provoca una ligera inclinación de este. Para reducir esta inclinación y no forzar el eje del servomotor, se ha utilizado una arandela en la articulación entre el eslabón 1 y el motor para que se apoye en ella el brazo. No obstante, una posible mejora del diseño para evitar parte de este problema podría ser reducir las dimensiones de los eslabones que forman el brazo, aligerando el peso de este y reduciendo el momento generado en su extremo.

Por último, se lleva a cabo el montaje de la pinza. Debido al aumento del tamaño de la ranura, las mordazas se tambaleaban durante su recorrido, provocando un funcionamiento incorrecto de la pinza. Se ha improvisado una posible solución rodeando el extremo de la mordaza con cinta adhesiva con la finalidad de aumentar su grosor y ajustarse mejor a la superficie de la ranura, mejorando notablemente el resultado. A continuación, se muestra el resultado del montaje de la pinza:



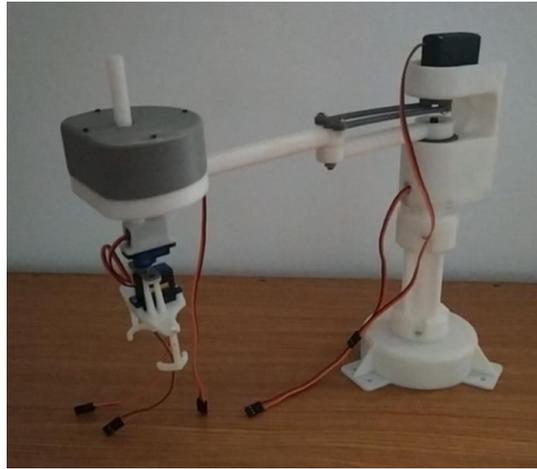
**Figura 86:** Montaje de la pinza

No obstante, debido a la longitud de las mordazas, se produce un movimiento inestable de estas que limitan el correcto funcionamiento de la pinza. Por lo tanto, se decide no realizar un desplazamiento muy largo de las pinzas con el fin de evitar la rotura de los transmisores de las mordazas, al ser piezas muy pequeñas y frágiles.

## Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

Una posible solución para mejorar el funcionamiento de la pinza sería, por un lado, rediseñar la geometría de la ranura para mejorar el ensamblaje con las mordazas y, por otro lado, reducir la longitud de las mordazas y situar su centro de masas más cerca del transmisor, con el fin de eliminar el momento angular que produce el tambaleo e inestabilidad de las mordazas durante su movimiento.

Una vez realizado el montaje de la pinza, se ensambla al resto del robot, finalizando de esta forma el montaje, como se muestra en la **Figura 87**:

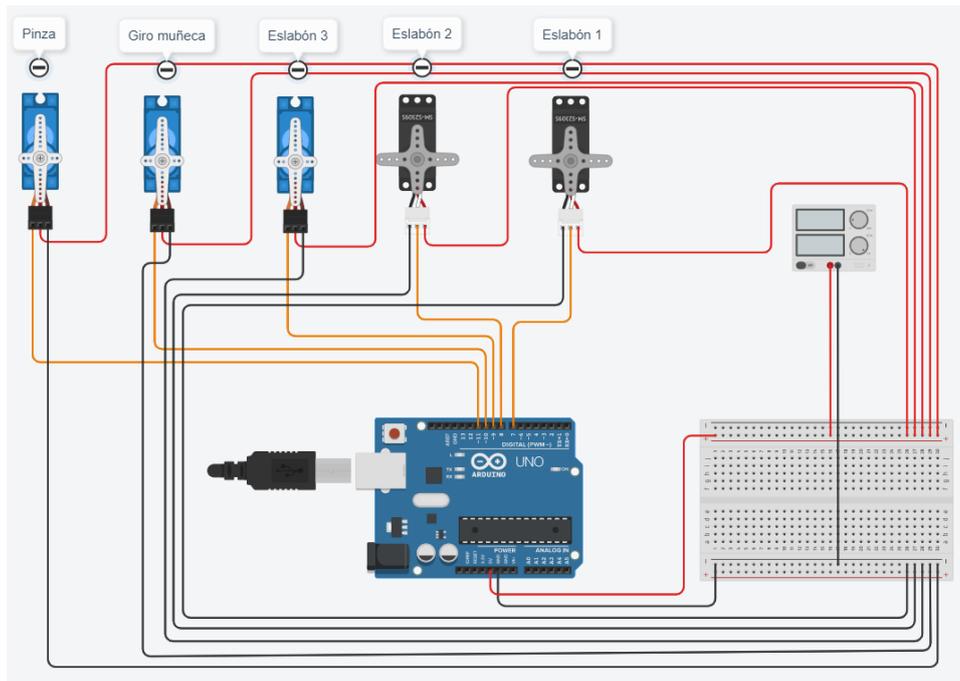


**Figura 87:** Ensamblaje final

### 2.10. CONEXIONADO DE LOS COMPONENTES

Una vez completo el montaje del robot e implementados, por consiguiente, los motores, se diseña el conexionado de los componentes que forman parte del circuito. Para ello, se utiliza el programa Tinkercad, y se añaden los componentes que participan en el circuito, que son: la placa Arduino UNO R3, una placa de pruebas pequeña, 3 servomotores del tipo SG90, 2 servomotores del tipo MG996R y un suministro de energía o fuente de alimentación. Realizando el conexionado de estos componentes, se obtiene el circuito que se muestra en la **Figura 88**:

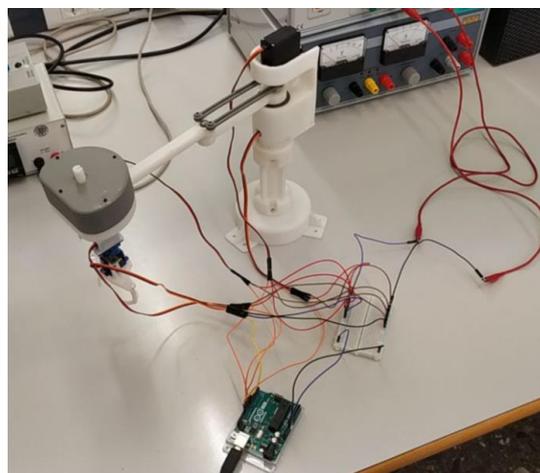
## Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad



**Figura 88:** Esquema del conexionado, indicando a qué parte del robot pertenece cada motor

Como puede observarse, los cables de señal de los servomotores se conectan a los pines de salida del 7 al 11. Por otro lado, los cables de corriente se conectan en paralelo con la fuente de alimentación y el pin de 5V de la placa Arduino. Los cables de masa se conectan, del mismo modo, en paralelo junto con la fuente de alimentación y el pin de tierra (GND) de la placa Arduino. De esta forma, los servomotores reciben la corriente necesaria para funcionar correctamente a la vez.

Una vez realizado el diseño en Tinkercad, se procede a realizar el montaje del circuito. Para ello, se necesita un total de 19 cables puente macho-macho: 3 para cada de servomotor (15 en total), 2 para los puertos de 5V y GND de la placa Arduino, y 2 para conectar las pinzas de cocodrilo de la fuente de alimentación. A continuación, se muestra el resultado final del montaje del robot:



**Figura 89:** Conexionado del robot

## 2.11. PROGRAMACIÓN EN ARDUINO

### 2.11.1. Presentación

A lo largo de esta parte, se describe el proceso a través del cual se ha planteado y llevado a cabo en Arduino IDE el código necesario para realizar las tareas planteadas.

Se realiza un total de 2 programas: uno destinado a llevar a cabo una prueba de mantenimiento realizando comprobaciones de movimiento de los motores, y otro destinado a realizar una serie de movimientos específicos que simulen el desplazamiento del brazo durante una tarea.

Cabe destacar que en este apartado se señalan únicamente los factores principales que conforman los programas. El código completo de cada uno de los programas junto a la explicación de las funciones se encuentra en el documento **Anexos** de este proyecto.

### 2.11.2. Descripción de las acciones propuestas

A la hora de pensar en los procesos que se quiere que el robot sea capaz de llevar a cabo, se plantea la realización de 2 programas diferentes enfocados a tareas distintas.

En primer lugar, se plantea realizar un proceso de mantenimiento que consista en la comprobación del correcto movimiento de las partes móviles del robot, así como del funcionamiento de los motores. El programa se encargaría de mover de uno en uno cada uno de los motores que forman parte del robot. Este proceso, como su nombre indica, estaría enfocado a analizar el estado en el que se encuentra el prototipo, por lo que se incluiría posteriormente en las pruebas de servicio del documento **Pliego de Condiciones** de este proyecto.

En segundo lugar, se plantea realizar una simulación de un proceso de agarre y desplazamiento de objetos o "pick & place". El robot realizaría la secuencia de movimientos necesarios para desplazar la herramienta a una primera localización, en la que se encontraría el posible objeto, para posteriormente moverse hasta la localización final, en la que dejaría ese objeto. Además, este proceso podría repetirse simultáneamente tantas veces como quisiera el usuario introduciendo el valor en cuestión, simulando un proceso repetitivo. Cuando el proceso completo finalizase, el robot volvería a su posición de reposo, definida mediante el análisis cinemático. Es necesario tener en cuenta que, dado que el funcionamiento de la pinza no permite un correcto agarre, se realizaría únicamente una simulación de movimiento sin coger ningún objeto.

### 2.11.3. Desarrollo del código

Una vez planteadas las ideas que definen el funcionamiento de los programas, se procede a desarrollar el código en Arduino IDE. A la hora de realizar el código de ambos programas, hay que tener en cuenta el hecho de que las líneas de código se leen de forma secuencial en el orden en el que se encuentra y no todas a la vez, además de que el programa se estructura en 3 partes principales: una primera sección en la que se incluyen las librerías necesarias y se definen, a su vez, las variables principales que se utilizan en el código; la función "setup", que es la primera en iniciarse y se utiliza para realizar las configuraciones necesarias para el correcto funcionamiento del programa; y la función en bucle "loop", que contiene el código que define el conjunto de procesos que se llevan a cabo y, como su nombre indica, se repite una vez ha finalizado.

Para poder utilizar los servomotores, es necesario incluir en ambos programas la librería encargada de entender las funciones relacionadas con el uso de estos, así como definirlos junto a sus posiciones de reposo. Dado que los servomotores son de 180 grados, se desplazan indicando el ángulo correspondiente a la posición deseada, que puede tener un valor comprendido entre 0 y 180, ambos incluidos.

Para la realización del programa encargado del proceso de comprobación del movimiento del robot, se lleva a cabo un código sencillo, en el cual el programa desplaza ligeramente cada uno de los eslabones del robot y los devuelve posteriormente a su posición de reposo. Cada vez que va a realizarse el movimiento de cada uno de los eslabones o se inicia el programa, se envía un mensaje con el texto correspondiente a través del monitor serie, el cual permite la entrada y salida de texto, y se realizan pausas tras cada acción para poder estudiar detenidamente cada uno de los movimientos realizados y reaccionar con tiempo a cualquier problema que pueda surgir. Por último, se notifica la finalización del proceso y se realiza una pausa de 60 segundos antes del reinicio del programa para poder finalizarlo antes de repetirse el proceso. El código completo del programa, así como una breve explicación de cada una de las funciones utilizadas, se encuentra en el **Anexo 3**.

Para la realización del programa encargado de la simulación de un proceso de desplazamiento, se lleva a cabo un código más complejo y completo que el anterior, en el cual el programa pide el número de veces que se desea realizar la secuencia de movimientos (estando las localizaciones definidas en el código). A través del monitor serie, el usuario escribe el valor deseado, y este se almacena en la variable correspondiente. Después, se realiza una conversión para convertir el valor en un número entero que pueda ser interpretado por el programa. Además, a lo largo del programa es necesario el uso de funciones condicionales: la función "if", que se lleva a cabo si se cumplen una o varias condiciones; y la función "while", que se repite siempre y cuando se sigan cumpliendo una o varias condiciones. Gracias al uso de estas funciones, el robot puede llevar a cabo el número de repeticiones indicado siempre que se cumplan las condiciones necesarias como, por ejemplo, que se haya introducido un valor válido. Además, dado que el programa se encuentra constantemente en bucle, el uso de estas puede impedir que se repita innecesariamente un mensaje de texto.

## Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

Después de realizar todos los movimientos que definen la secuencia, se vuelven a realizar hasta que se lleven a cabo todas las posiciones deseadas. Al finalizar completamente, un mensaje notifica el final de la simulación y el robot vuelve a su posición de reposo. Al igual que en el primer programa, se hace una pausa de 60 segundos hasta que vuelva a reiniciarse completamente. El código completo del programa, así como una breve explicación de cada una de las funciones utilizadas, se encuentra en el **Anexo 4**.

## 3. ENSAYO Y CONCLUSIONES

---

### 3.1. ENSAYO Y RESULTADOS

Una vez realizados los programas, se han llevado a cabo dos ensayos en un laboratorio de la universidad para comprobar el correcto funcionamiento del código y del robot, enviando la información de los programas a la placa Arduino y comprobando que todos los órdenes establecidas se realicen sin ningún problema. Además, se verifica que la relación entre los componentes que forman parte del ensamblaje es la adecuada y se permite un correcto movimiento del robot.

En el primer ensayo, el robot realizó la tarea de comprobación de los motores establecida en el primer programa. Tras la compilación y el envío del programa a la placa Arduino, el robot pudo llevar a cabo correctamente el proceso descrito en el código. Sin embargo, debido a un error en la lectura de programas en la placa, el servomotor correspondiente al eslabón 1 realizó un comportamiento anómalo en una de las pruebas, realizando un giro que no aparecía en el código y provocando la rotura de uno de los salientes del eslabón 2, en los que se encuentran conectados las varillas. Afortunadamente, se ha podido realizar un arreglo utilizando un tornillo con un diámetro prácticamente idéntico al del saliente, pudiendo conectar nuevamente la varilla. Al volver a compilar el programa después, el robot volvió a funcionar correctamente. No obstante, tras este incidente, se ha pensado en que una posible mejora a añadir al robot podría ser la instalación de finales de carrera o sensores de seguridad, de forma que impidan que se produzcan fallos en el funcionamiento que puedan ocasionar un daño severo en los componentes o a los usuarios.

En el segundo ensayo, el robot realizó la simulación establecida en el segundo programa. Al igual que en el primer ensayo, el prototipo logró llevar a cabo la simulación de manera satisfactoria, reproduciendo cada una de las operaciones que se encontraban en el código y repitiéndolas las veces que fueron indicadas al principio.

Tras la comprobación de la simulación, se ha decidido ejecutarla una segunda vez añadiendo una carga de aproximadamente 50 gramos (simulando un tubo de ensayo ligeramente lleno) en el extremo de la pinza, simulando el agarre de un objeto pequeño. Como la pinza no funciona correctamente, se ha adherido el objeto a la herramienta, con la finalidad de comprobar que el prototipo sea capaz de levantar una carga adicional. Tras el ensayo, se ha verificado el correcto funcionamiento del robot bajo los efectos de una carga adicional.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos realizados, se puede afirmar que el robot funciona tal y como se ha planteado inicialmente. Si bien el mal funcionamiento de la pinza ha sido un factor limitante a la hora de programar la simulación, los resultados de los ensayos demuestran que el prototipo es capaz de realizar funciones de agarre y desplazamiento de objetos con una herramienta más funcional, como otra pinza con una mejor estructura o un electroimán.

### 3.2. CONCLUSIONES Y POSIBLES MEJORAS

La realización de este proyecto ha supuesto un reto dada la cantidad de factores que lo envuelven, y ha estimulado enormemente el aprendizaje durante su desarrollo. Por un lado, se ha llevado a cabo el diseño y modelado de las piezas que forman el prototipo del robot, además de realizar la fabricación y el ensamblaje de estas. Por otro lado, se han logrado aplicar correctamente los conocimientos de robótica durante el análisis cinemático del robot, y se han desarrollado los conocimientos de electrónica y de programación durante el conexionado de los componentes y el desarrollo del código. Además, durante el desarrollo del proyecto, han aparecido una serie de obstáculos y limitaciones que han supuesto una dificultad adicional el desarrollo de este. Sin embargo, se han logrado superar cada uno de ellos de forma satisfactoria y se han planteado soluciones alternativas para mejorar el diseño del prototipo y que pueda adaptarse a dichos problemas más eficientemente. Por último, el robot ha podido llevar a cabo de forma satisfactoria la simulación planteada y se ha podido verificar su aplicación en el sector de la investigación.

Como posibles mejoras para lograr un mejor funcionamiento del robot, se encuentran las siguientes:

- Añadir finales de carrera o sensores de proximidad para impedir fallos en el funcionamiento que puedan suponer un riesgo para los componentes que lo forman y, sobre todo, para los usuarios.
- Reducir el tamaño de los eslabones que forman el brazo del prototipo, y desplazar su centro de gravedad hacia el hombro para generar un contrapeso que impida la inclinación del brazo.
- Añadir un refuerzo adicional en la base del hombro, de forma que aumente la resistencia de la parte en voladizo de la pieza.
- Instalar una cámara o un sensor para detectar el objeto con el que se desea interactuar.
- Rediseñar la estructura de la pinza, de forma que las mordazas presenten una mayor estabilidad y se produzca un mejor deslizamiento que permita una correcta apertura y cierre de la herramienta.
- Añadir otras herramientas para ampliar las tareas que puede realizar el robot como, por ejemplo, un electroimán.

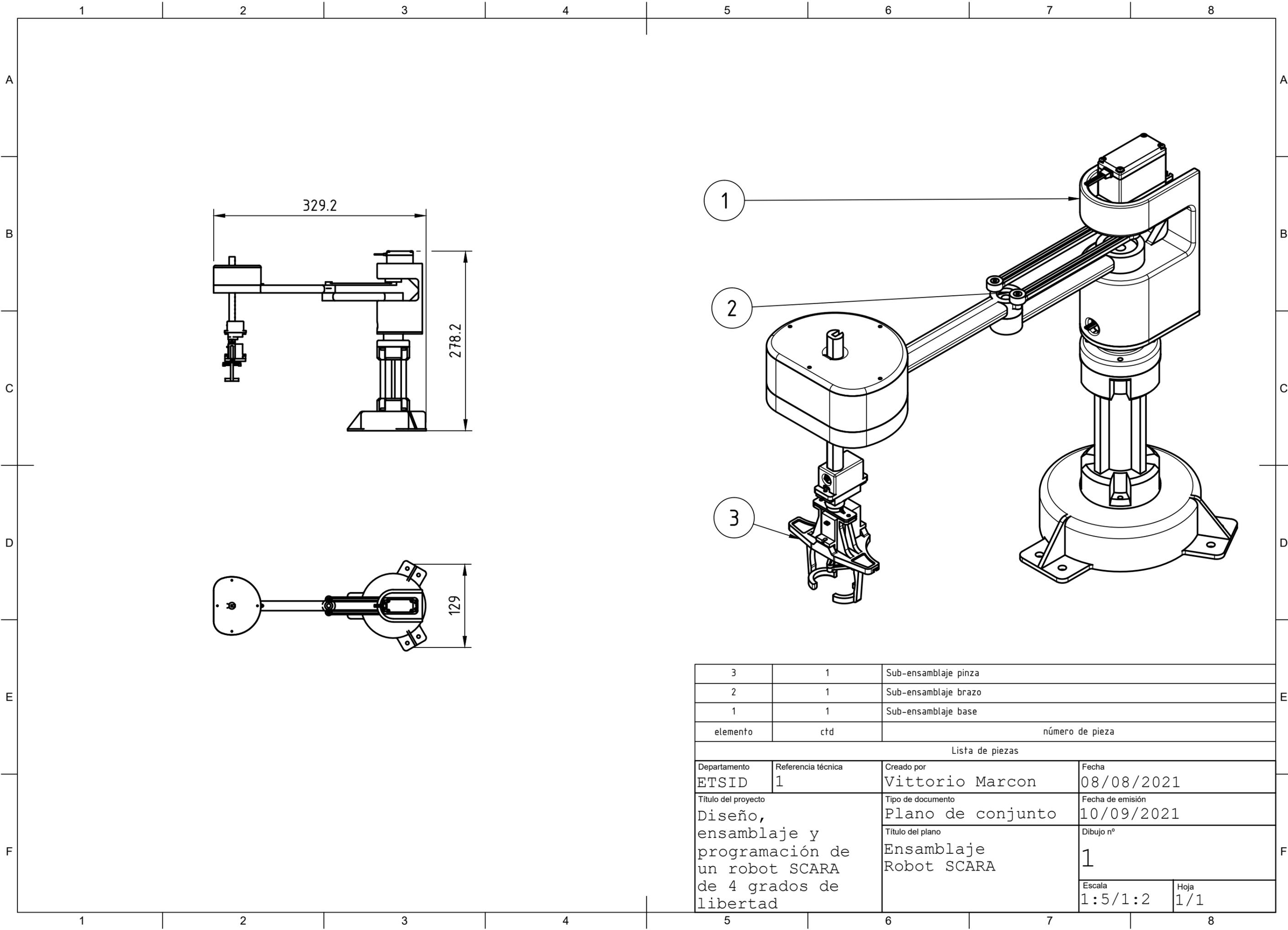
## 4. BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Anónimo (03-07-2017). *Inventos griegos, los autómatas de Herón*. Historia, National Geographic. Actualizado en 10-01-2018.
- [2] Denavit, Jacques; Hartenberg, Richard Scheunemann (1955). *A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices*. *Trans ASME J. Appl. Mech.* 23: 215-221. Evanston, Illinois.
- [3] Hartenberg, Richard Scheunemann; Denavit, Jacques (1965). *Kinematic synthesis of linkages McGraw-Hill series in mechanical engineering*. Archivado desde el original en 28-09-2013. Recuperado en 13-01-2012. McGraw-Hill, Nueva York.
- [4] González Sorribes, Antonio (2021). *Apuntes de la asignatura Robótica*. Universitat Politècnica de València. Valencia, España.
- [5] Mendoza García, Ricardo Franco (16-06-2015). *Fundamentos de Robótica. Cinemática Inversa*. Escuela Universitaria de Ingeniería Mecánica. Universidad de Taparacá. Arica, Chile.
- [6] Agustín Fonfría, Miguel A. (2021). *Apuntes de la asignatura Dibujo Asistido por Ordenador 3D*. Universitat Politècnica de València. Valencia, España.
- [7] Karam, Lina J.; McClellan, James H. (03-1995). *Complex Chebyshev Approximation for FIR Filter Design*. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing* (pp. 157-162). Mathworks.
- [8] Romeo, A. (03-2009). *The role of simulation tools in the teaching of robot control and programming*. In *40th International Symposium on Robotics* (pp. 157-162). Barcelona, España.
- [9] Del Valle Hernández, Luis (2018). *Servomotor con Arduino tutorial de programación paso a paso*. <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/servomotor-con-arduino/>
- [10] Castaño Giraldo, Sergio A. (18-12-2019). *Como usar un Servomotor con Arduino (180° y 360°)*. <https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/servomotor/>

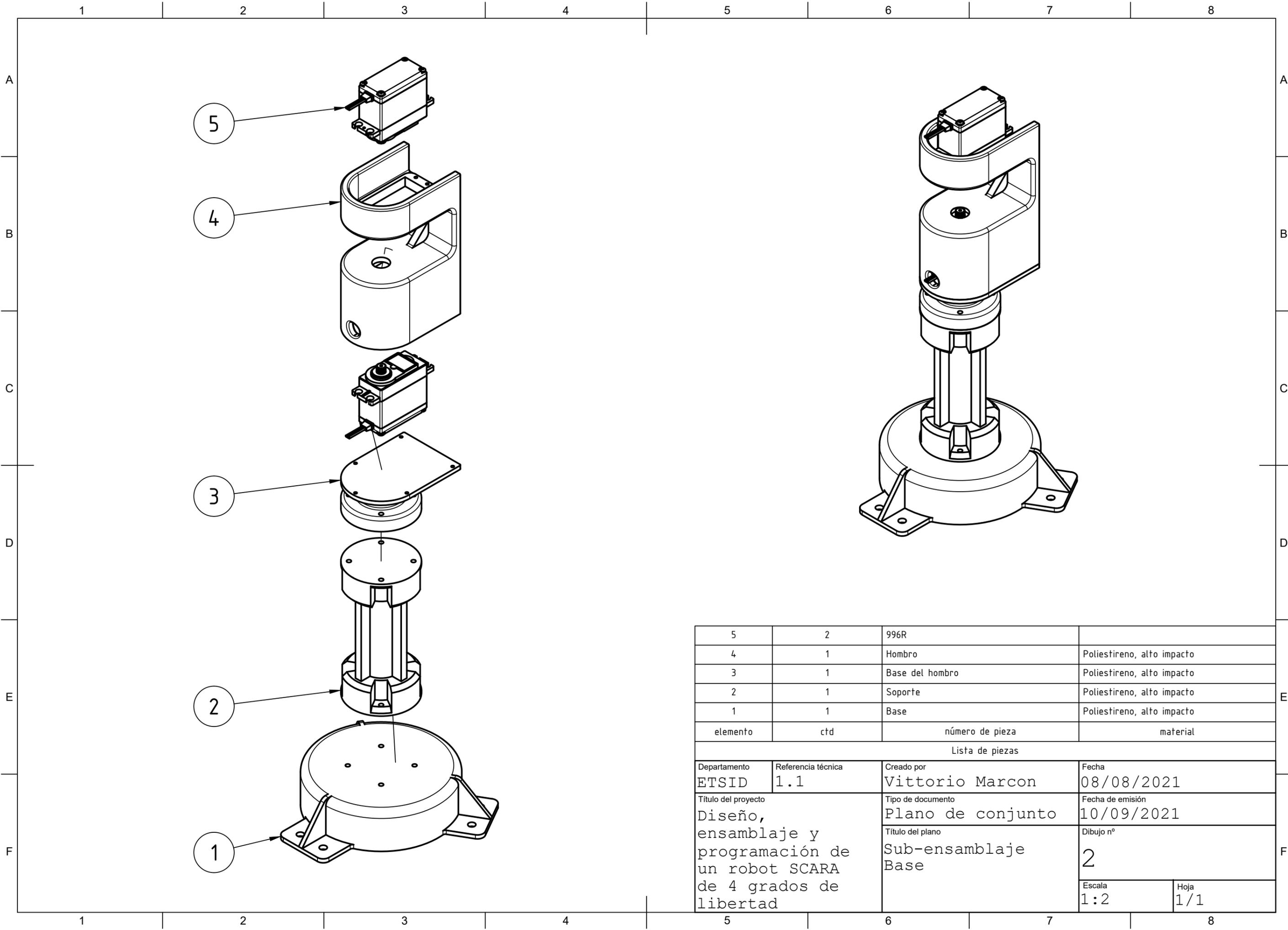


## II. PLANOS



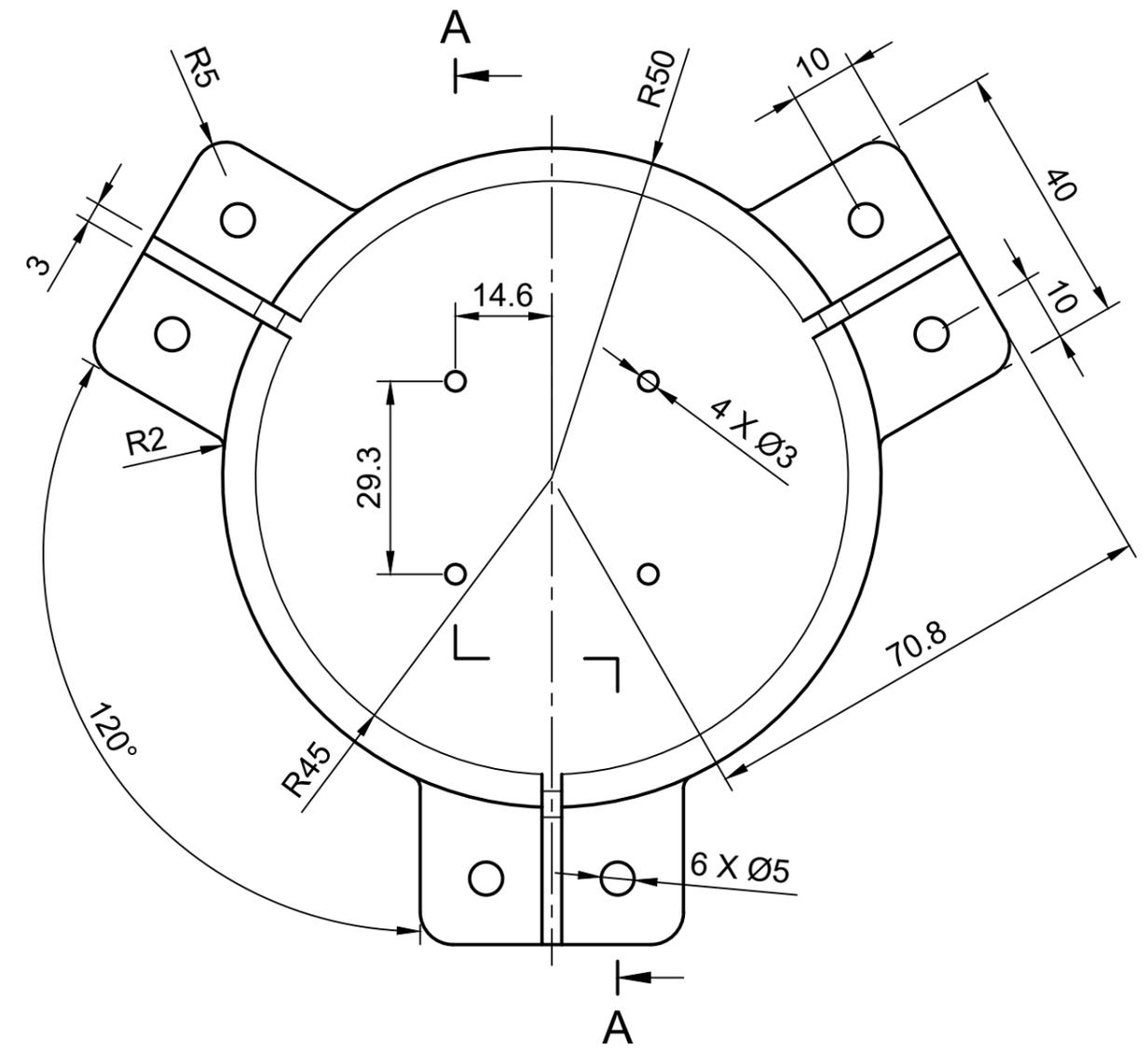
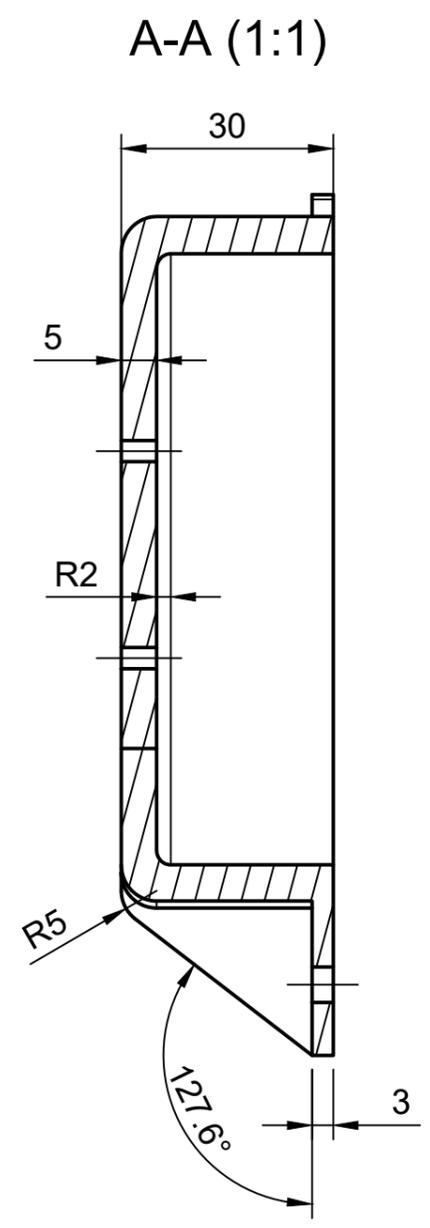
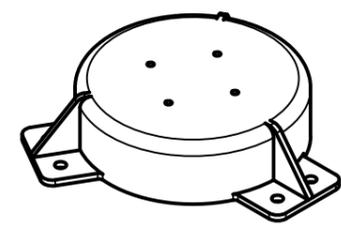
3	1	Sub-ensamblaje pinza
2	1	Sub-ensamblaje brazo
1	1	Sub-ensamblaje base
elemento	ctd	número de pieza

Lista de piezas			
Departamento	Referencia técnica	Creado por	Fecha
ETSID	1	Vittorio Marcon	08/08/2021
Título del proyecto		Tipo de documento	Fecha de emisión
Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Plano de conjunto	10/09/2021
		Título del plano	Dibujo nº
		Ensamblaje Robot SCARA	1
		Escala	Hoja
		1:5/1:2	1/1

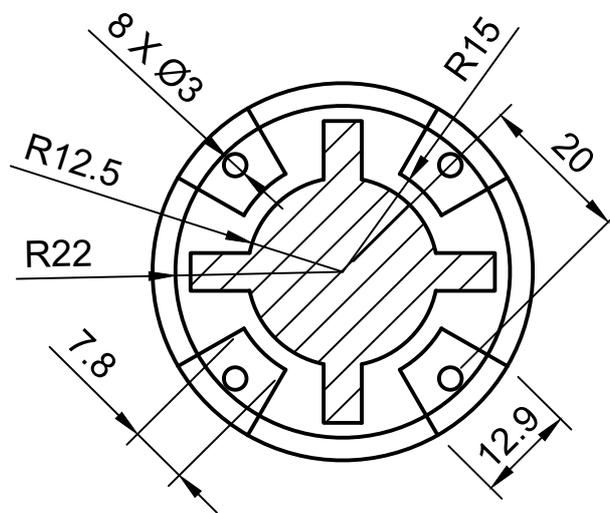
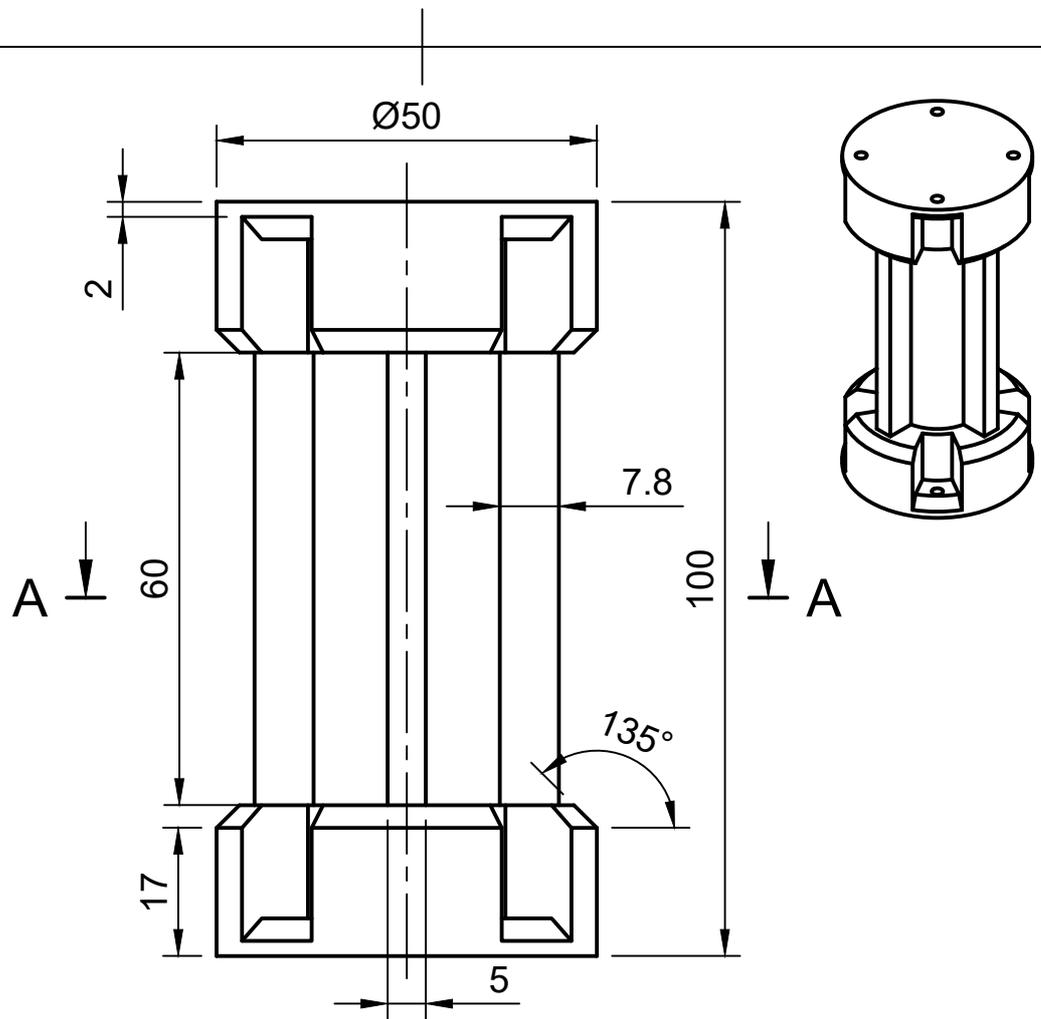


5	2	996R	
4	1	Hombro	Poliestireno, alto impacto
3	1	Base del hombro	Poliestireno, alto impacto
2	1	Soporte	Poliestireno, alto impacto
1	1	Base	Poliestireno, alto impacto
elemento	ctd	número de pieza	material

Lista de piezas			
Departamento	Referencia técnica	Creado por	Fecha
ETSID	1.1	Vittorio Marcon	08/08/2021
Título del proyecto		Tipo de documento	Fecha de emisión
Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Plano de conjunto	10/09/2021
		Título del plano	Dibujo nº
		Sub-ensamblaje Base	2
		Escala	Hoja
		1:2	1/1

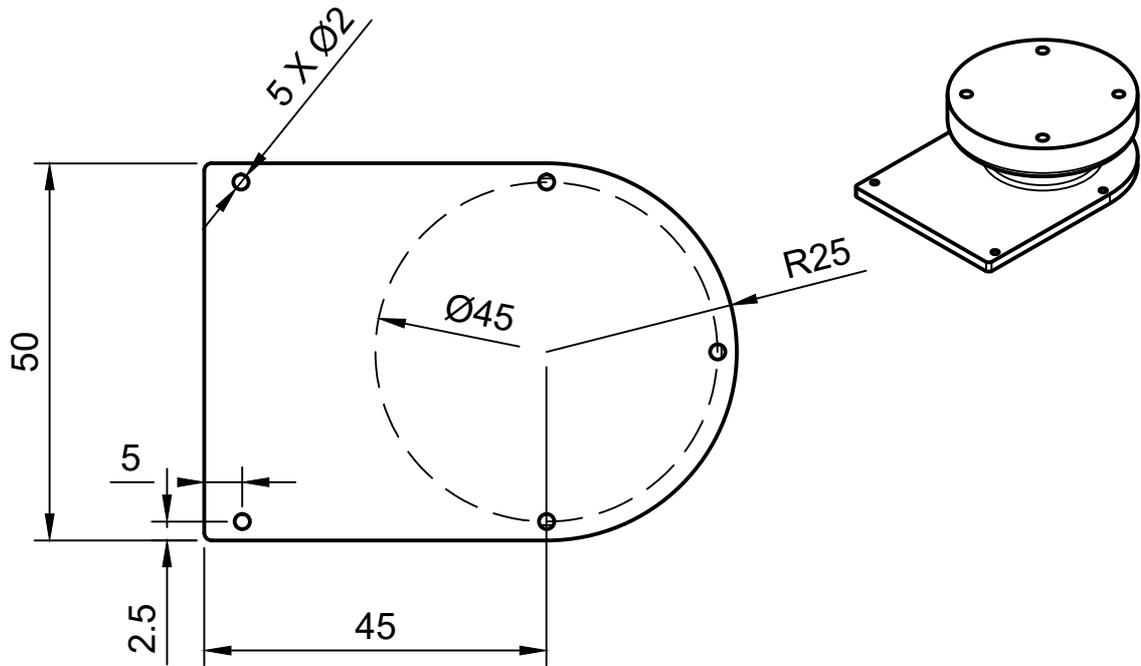


Departamento ETSID	Referencia técnica 1.1.1	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 17/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Base	Dibujo nº 3
		Escala 1:1	Hoja 1/1

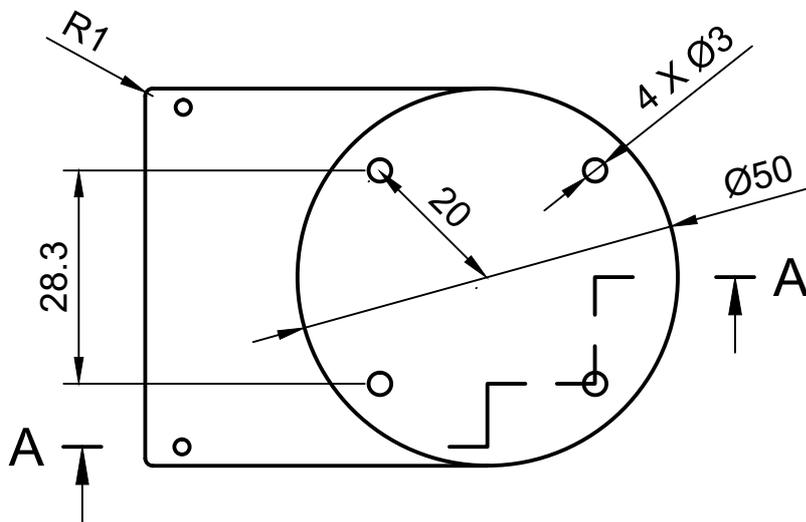
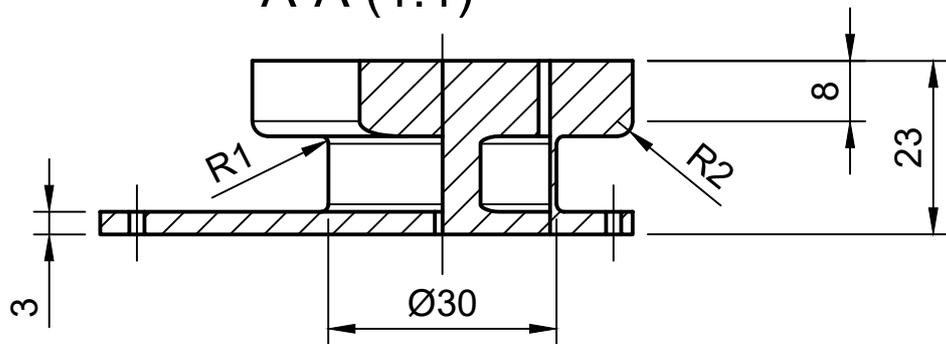


A-A (1:1)

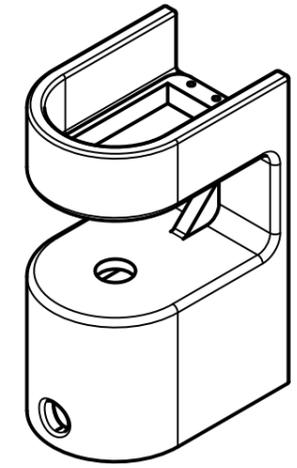
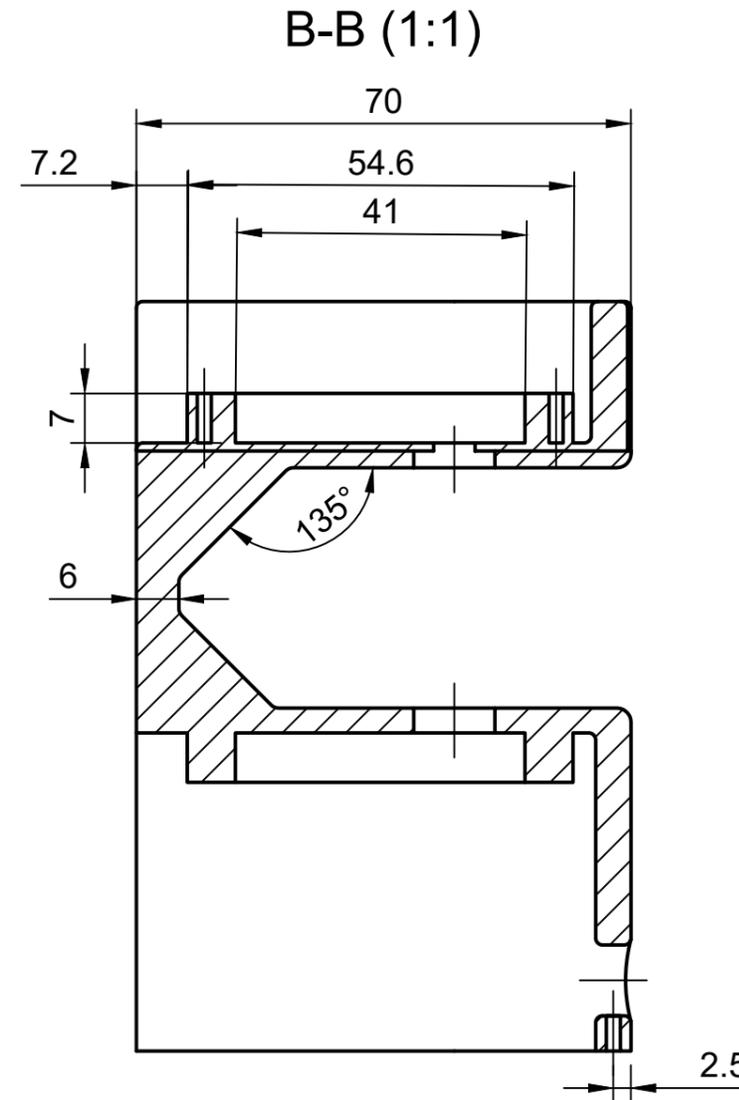
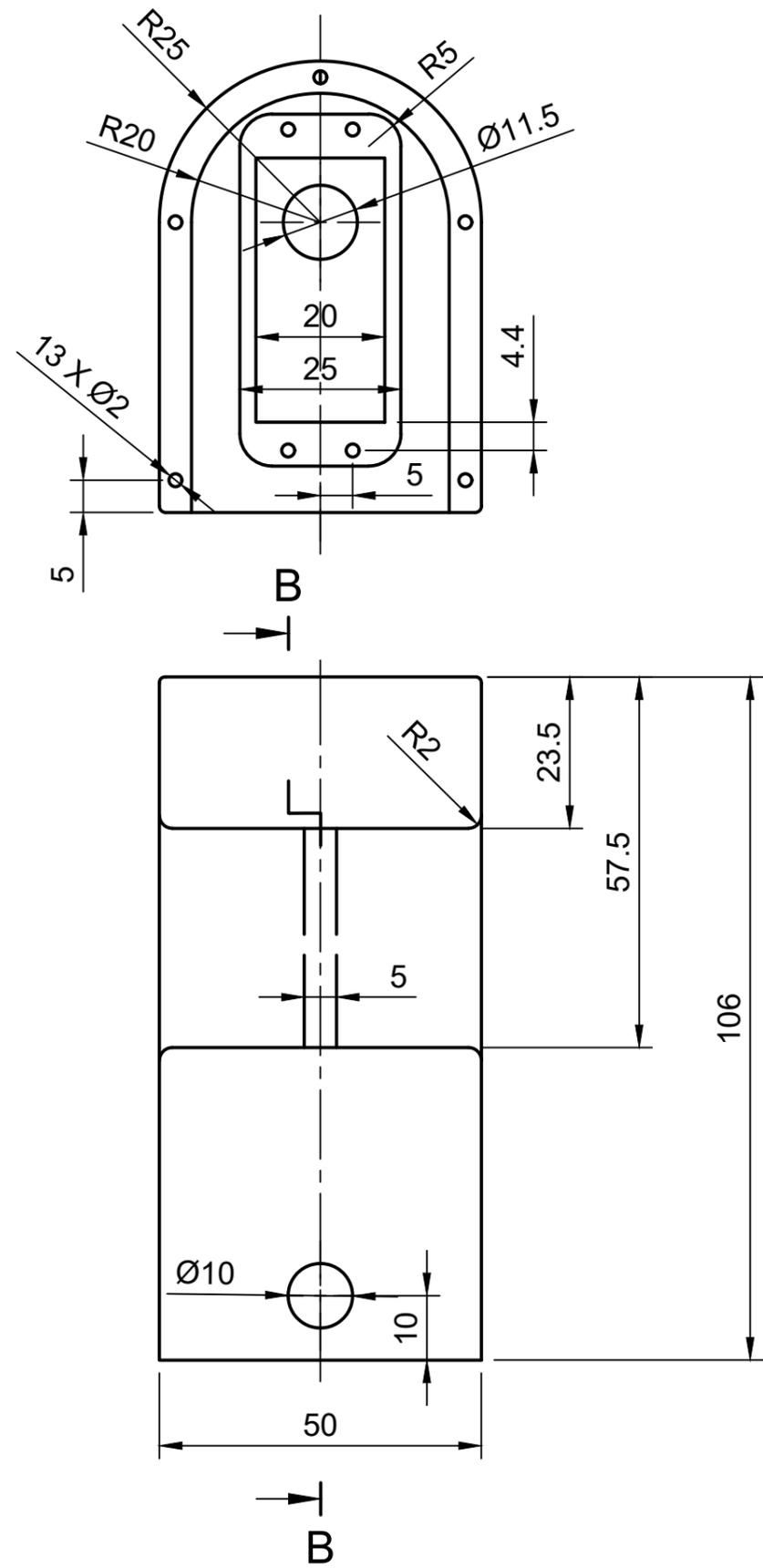
Departamento ETSID	Referencia técnica 1.1.2	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 15/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Soporte	Dibujo nº 4
		Escala 1:1	Hoja 1/1



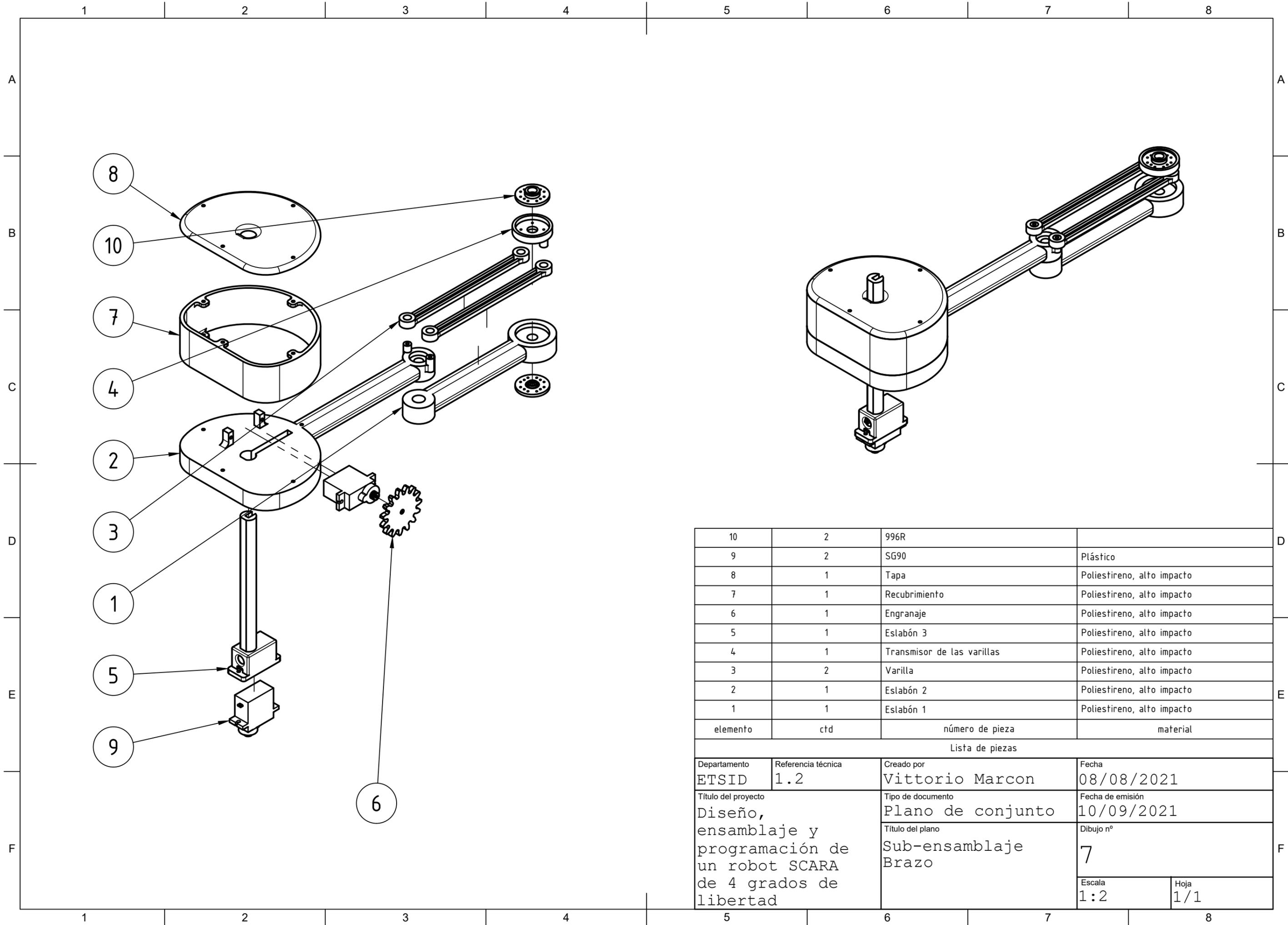
A-A (1:1)



Departamento ETSID	Referencia técnica 1.1.3	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 17/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Base hombro	Dibujo nº 5
		Escala 1:1	Hoja 1/1



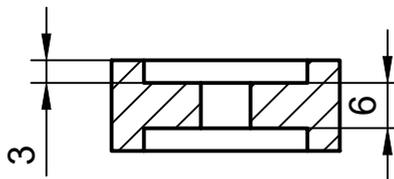
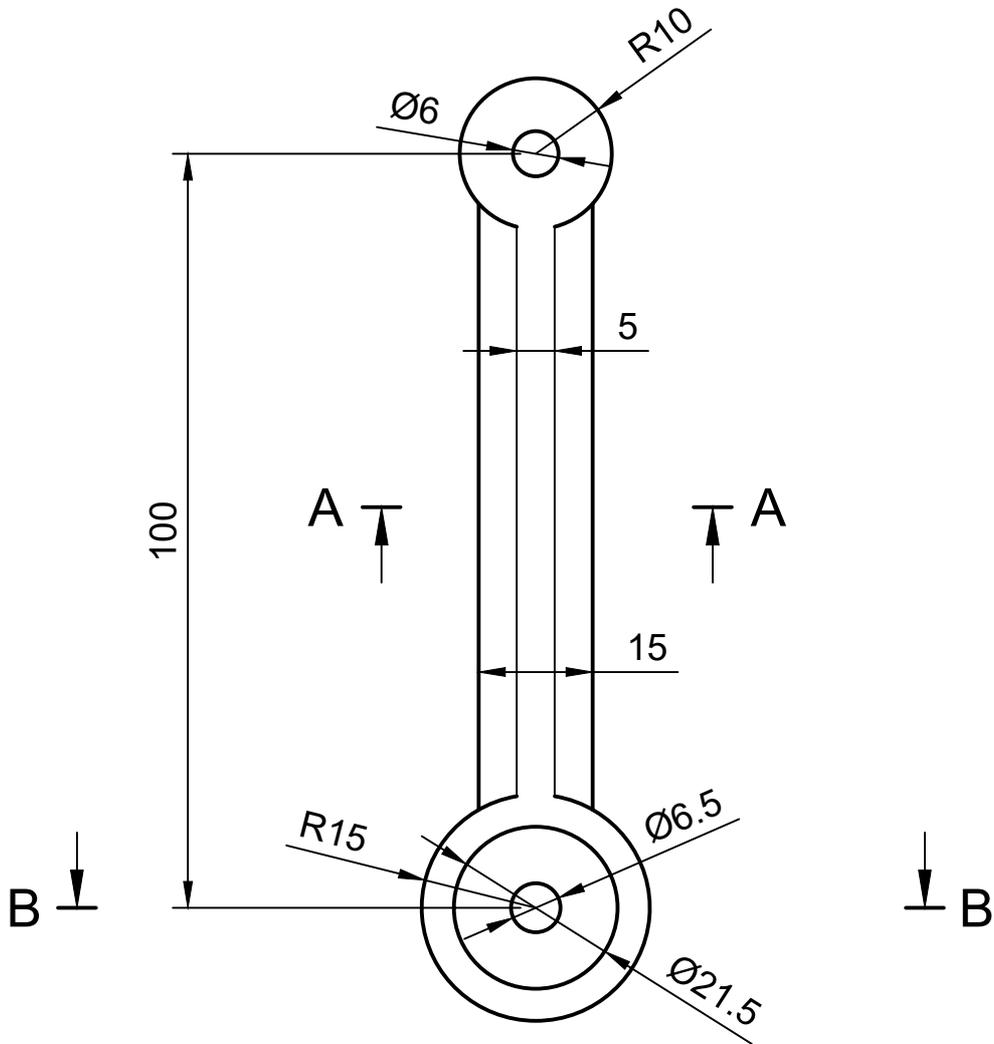
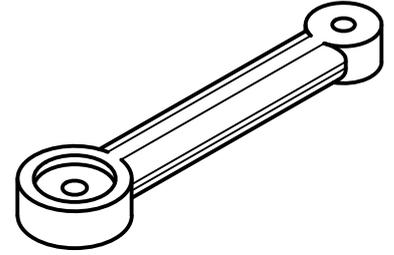
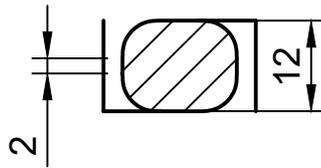
Departamento ETSID	Referencia técnica 1.1.4	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 24/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Hombro	Dibujo nº 6
		Escala 1:1	Hoja 1/1



10	2	996R	
9	2	SG90	Plástico
8	1	Tapa	Poliestireno, alto impacto
7	1	Recubrimiento	Poliestireno, alto impacto
6	1	Engranaje	Poliestireno, alto impacto
5	1	Eslabón 3	Poliestireno, alto impacto
4	1	Transmisor de las varillas	Poliestireno, alto impacto
3	2	Varilla	Poliestireno, alto impacto
2	1	Eslabón 2	Poliestireno, alto impacto
1	1	Eslabón 1	Poliestireno, alto impacto
elemento	ctd	número de pieza	material

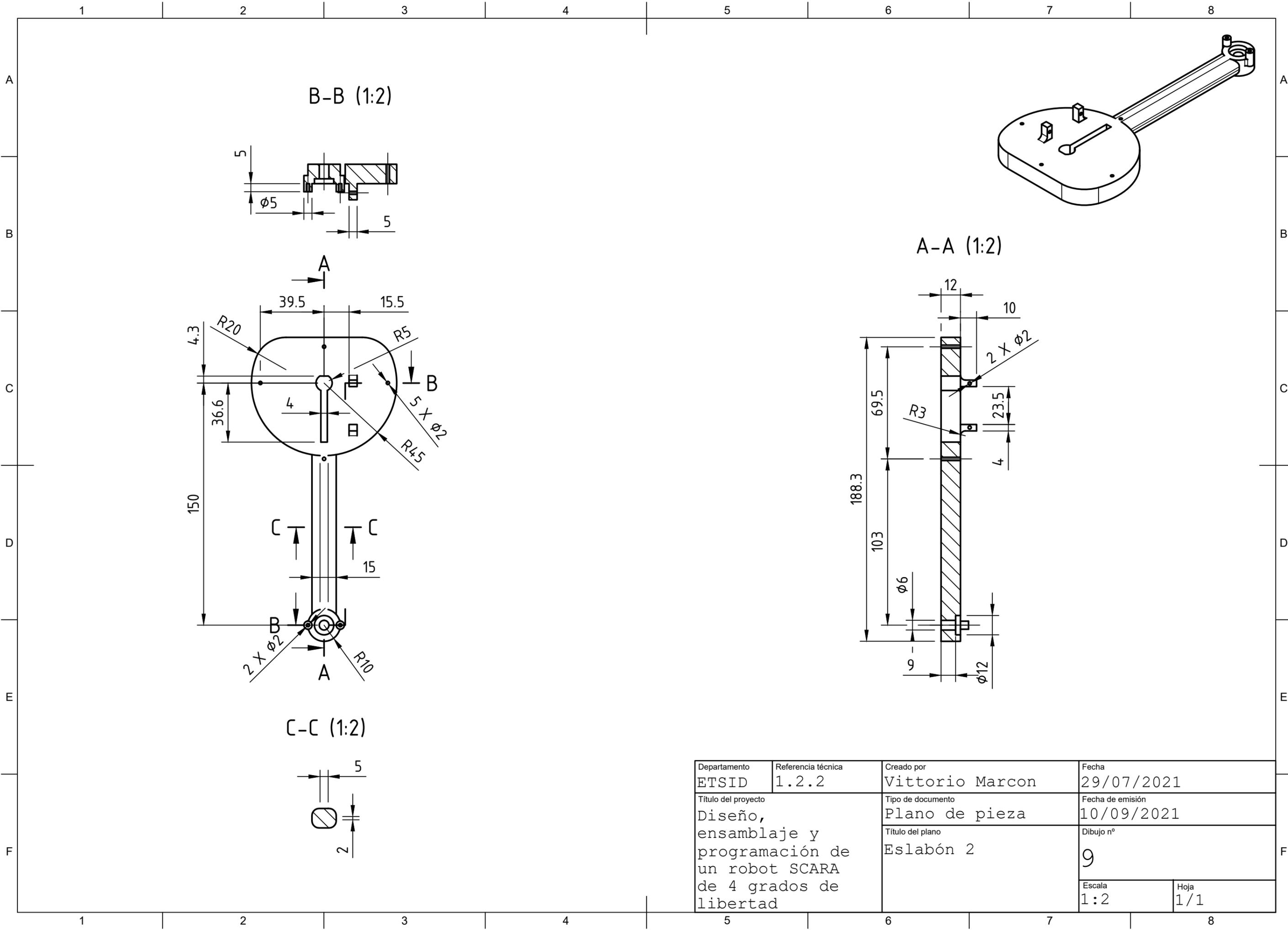
Lista de piezas			
Departamento	Referencia técnica	Creado por	Fecha
ETSID	1.2	Vittorio Marcon	08/08/2021
Título del proyecto		Tipo de documento	Fecha de emisión
Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Plano de conjunto	10/09/2021
		Título del plano	Dibujo nº
		Sub-ensamblaje Brazo	7
		Escala	Hoja
		1:2	1/1

A-A (1:1)



B-B (1:1)

Departamento ETSID	Referencia técnica 1.2.1	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 15/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Eslabón 1	Dibujo nº 8
		Escala 1:1	Hoja 1/1



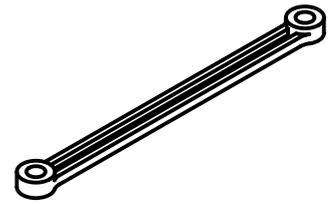
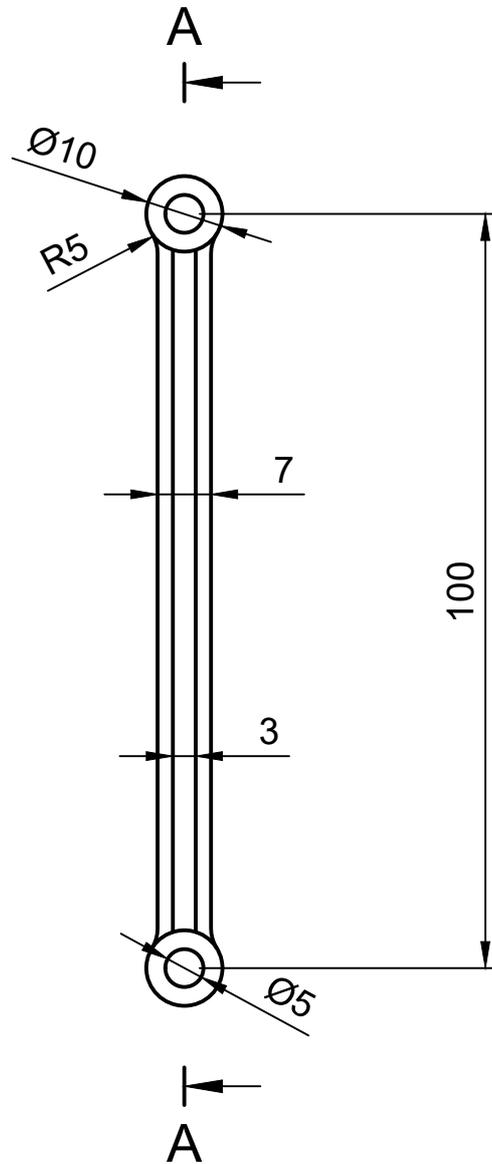
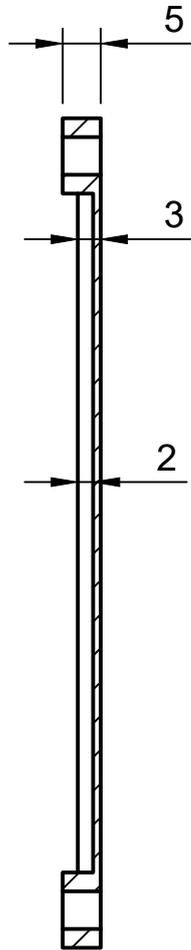
B-B (1:2)

A-A (1:2)

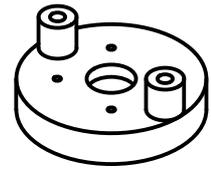
C-C (1:2)

Departamento ETSID	Referencia técnica 1.2.2	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 29/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Eslabón 2	Dibujo nº 9
		Escala 1:2	Hoja 1/1

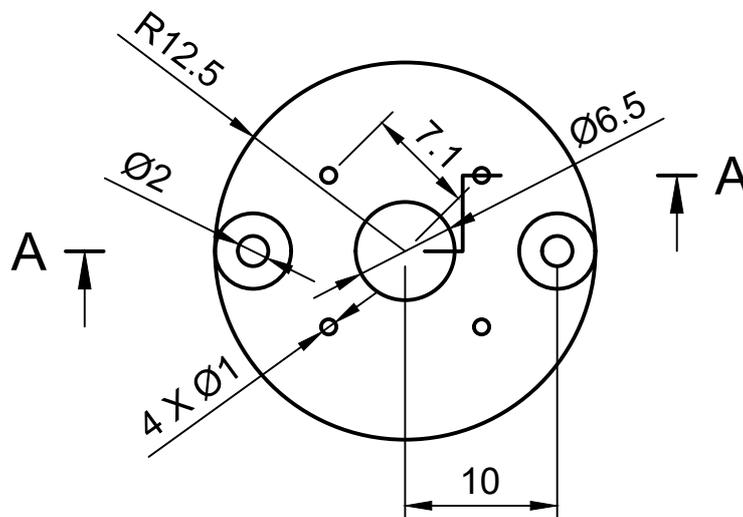
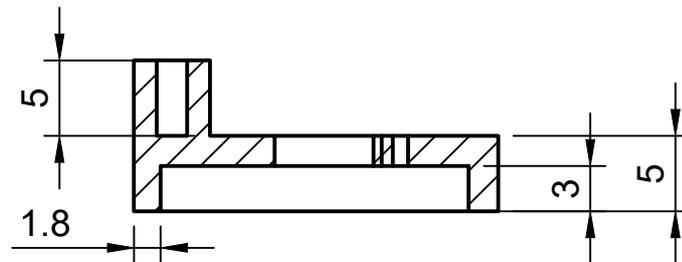
A-A (1:1)



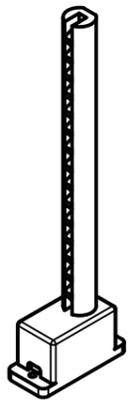
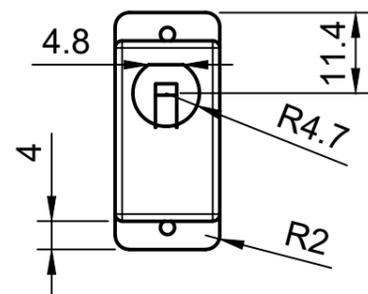
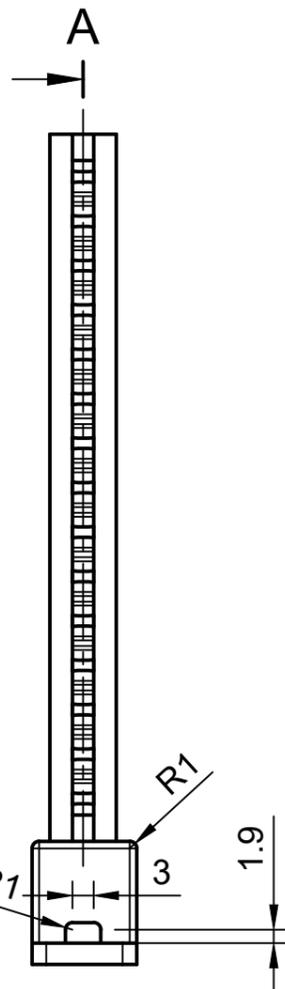
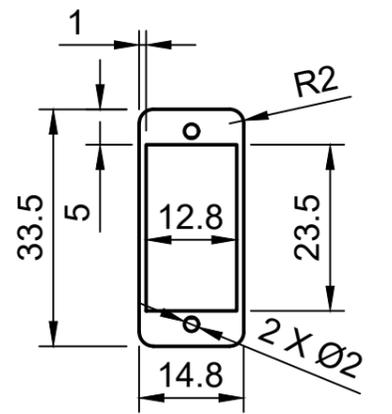
Departamento ETSID	Referencia técnica 1.2.3	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 15/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Varilla	Dibujo nº 10
		Escala 1:1	Hoja 1/1



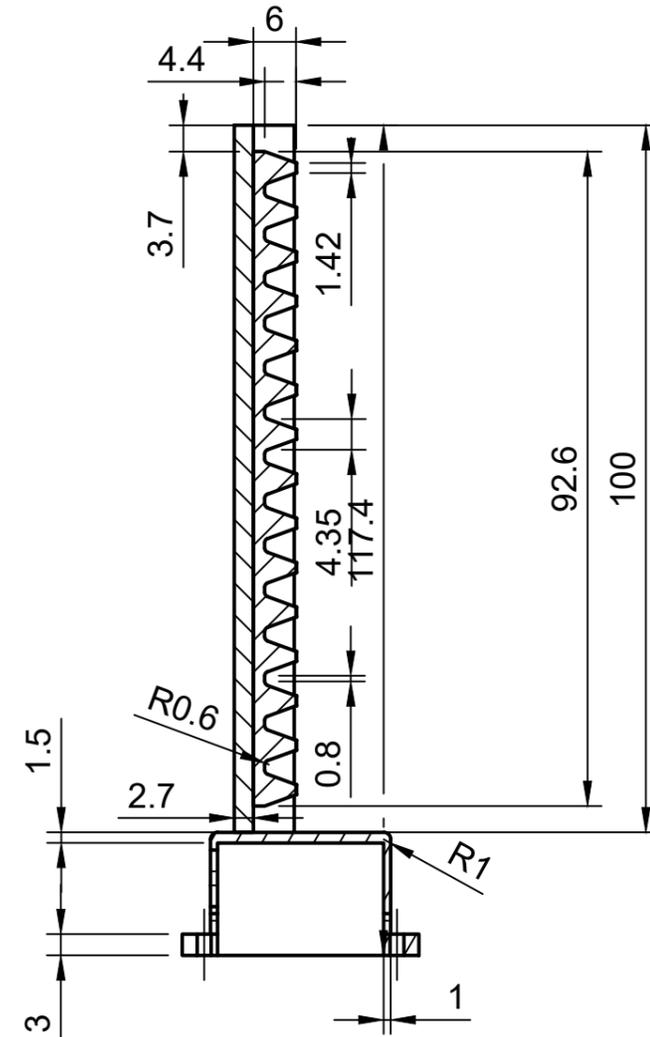
A-A (2:1)



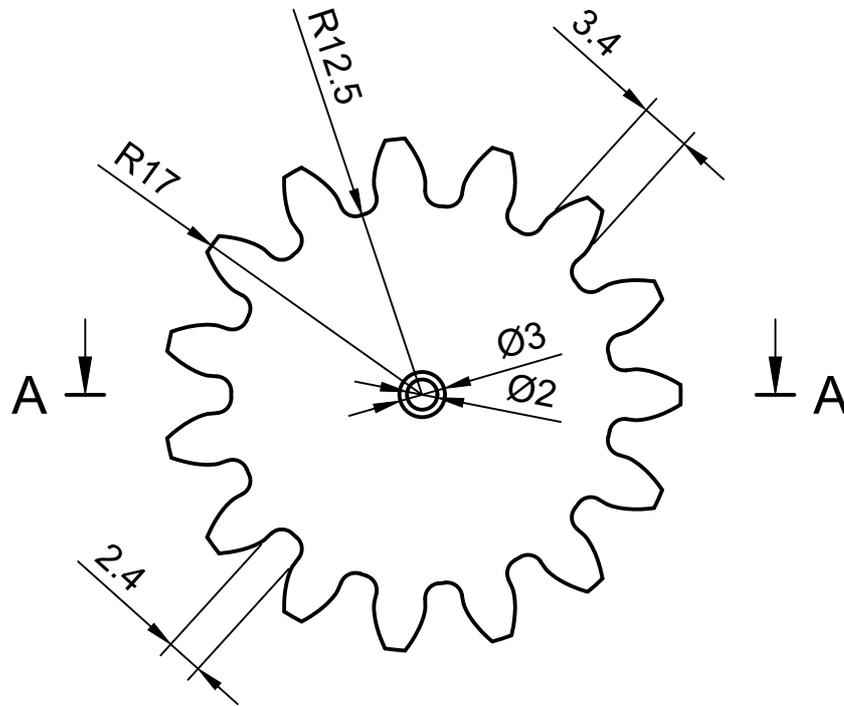
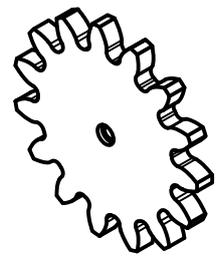
Departamento ETSID	Referencia técnica 1.2.4	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 15/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Transmisor varillas	Dibujo nº 11
		Escala 2:1	Hoja 1/1



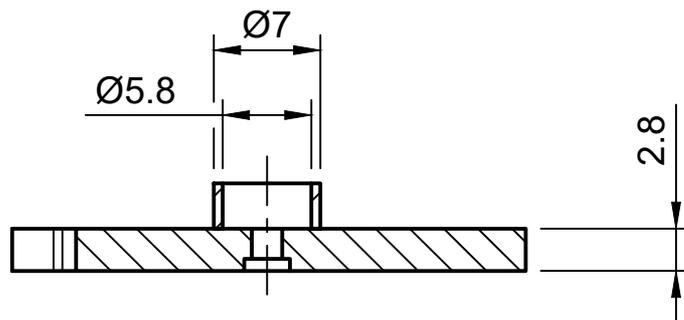
A-A (1:1)



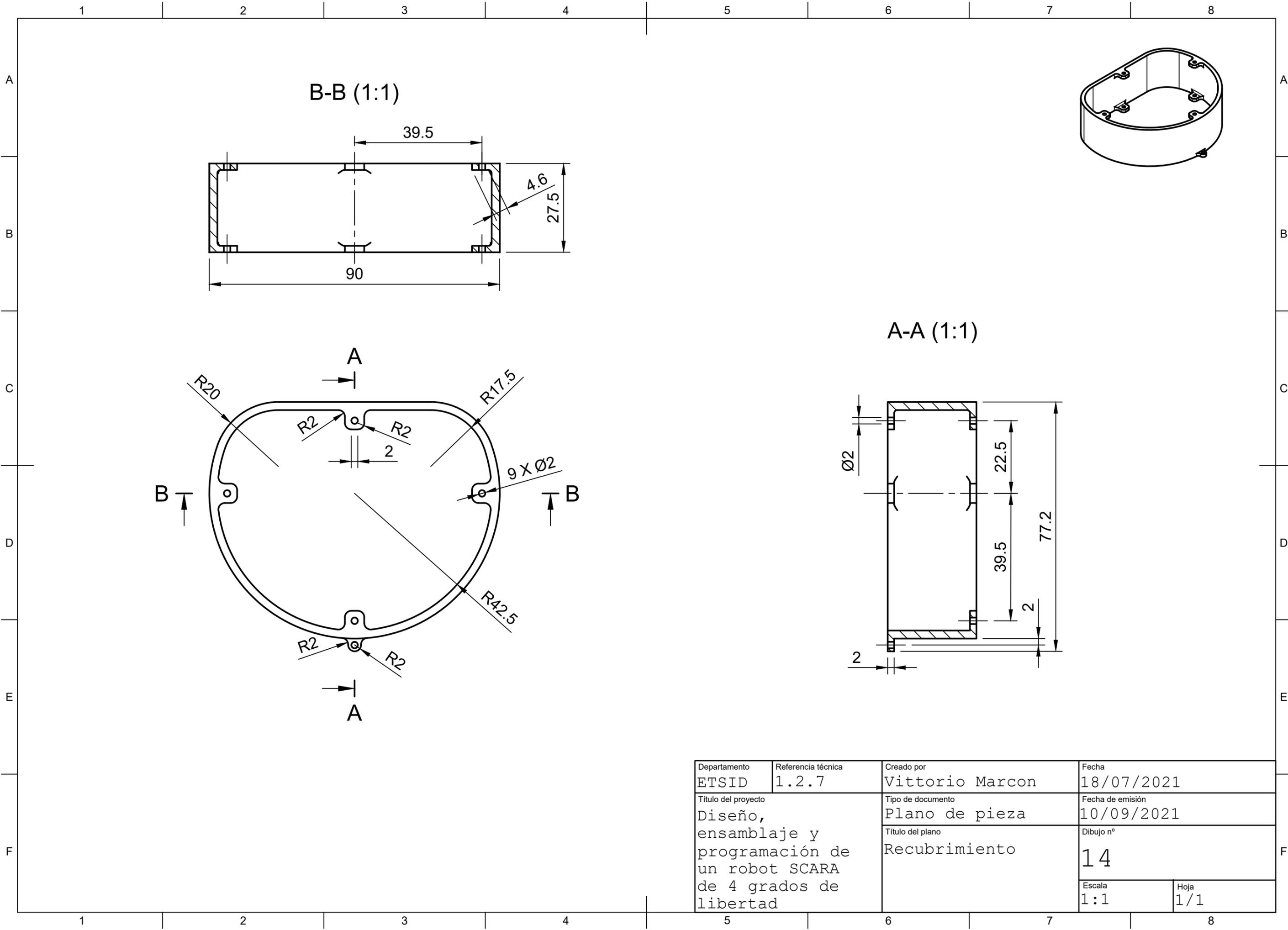
Departamento ETSID	Referencia técnica 1.2.5	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 17/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Eslabón 3	Dibujo nº 12
		Escala 1:1	Hoja 1/1



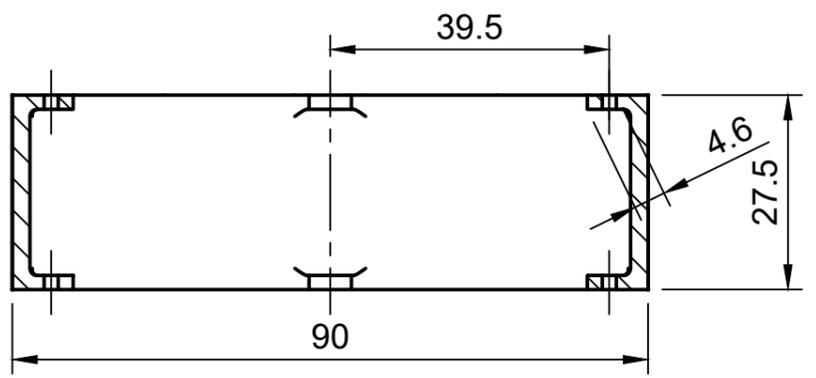
A-A (2:1)



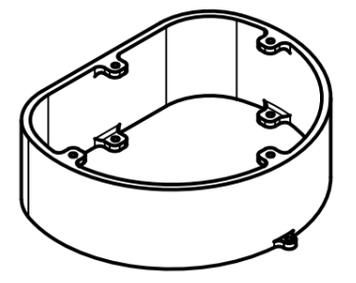
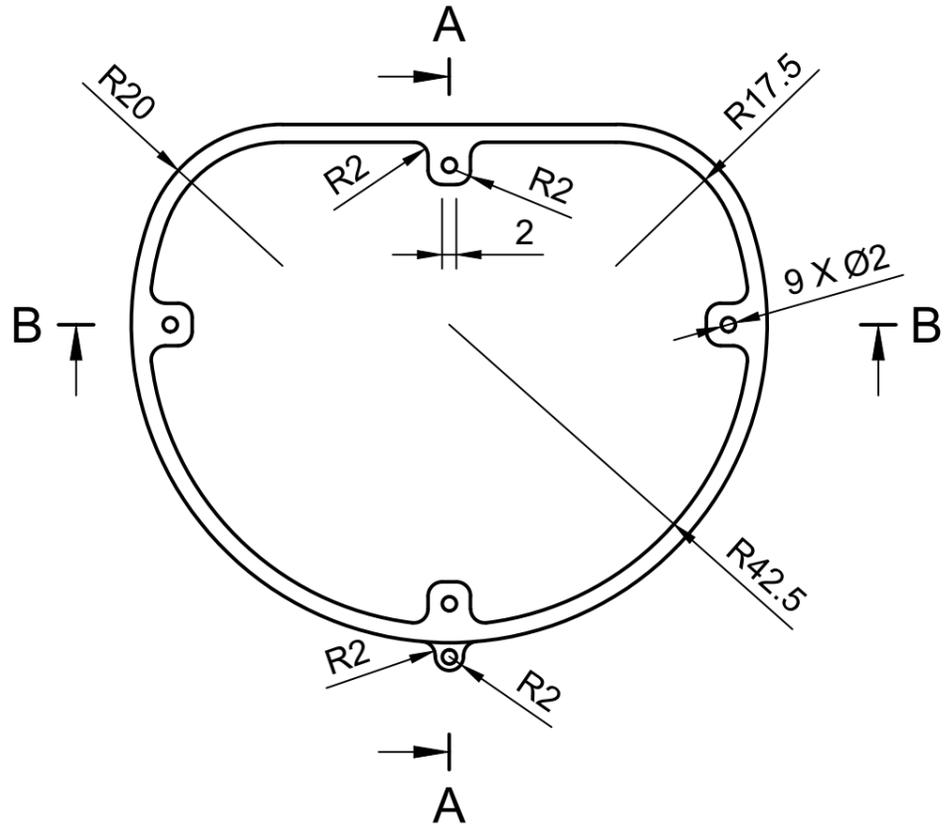
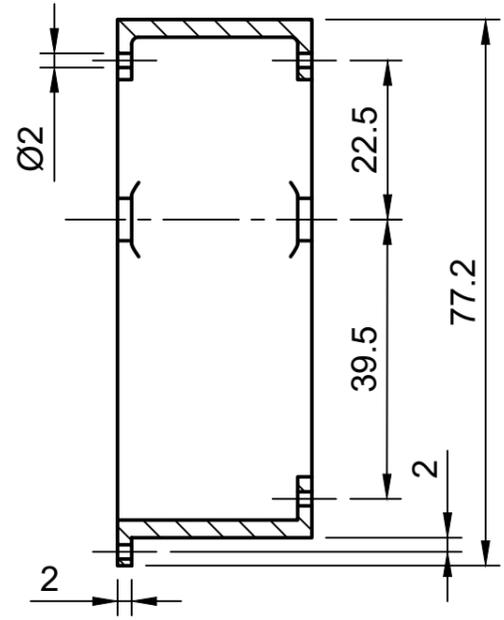
Departamento ETSID	Referencia técnica 1.2.6	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 14/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Engranaje	Dibujo nº 13
		Escala 2:1	Hoja 1/1



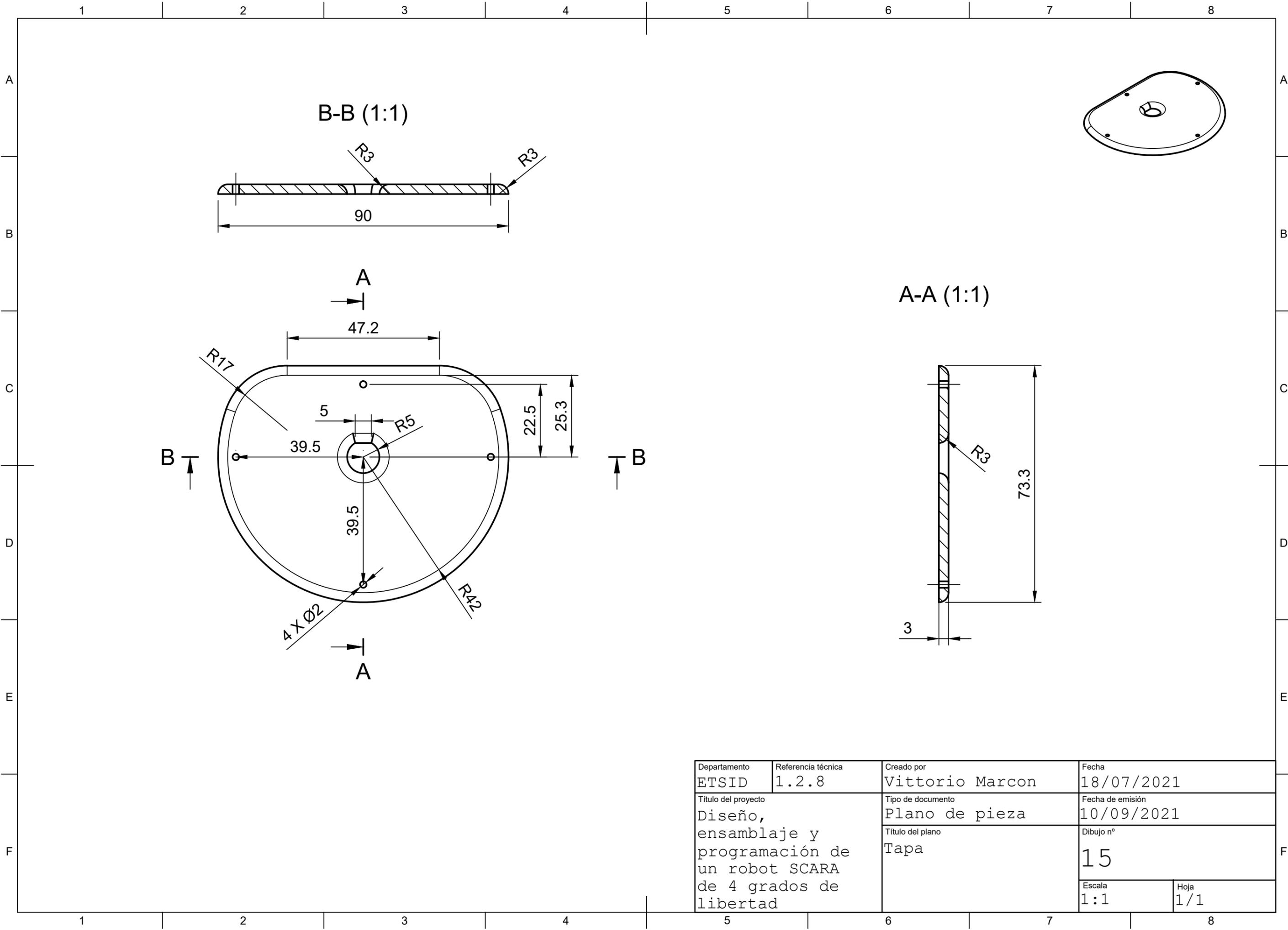
B-B (1:1)



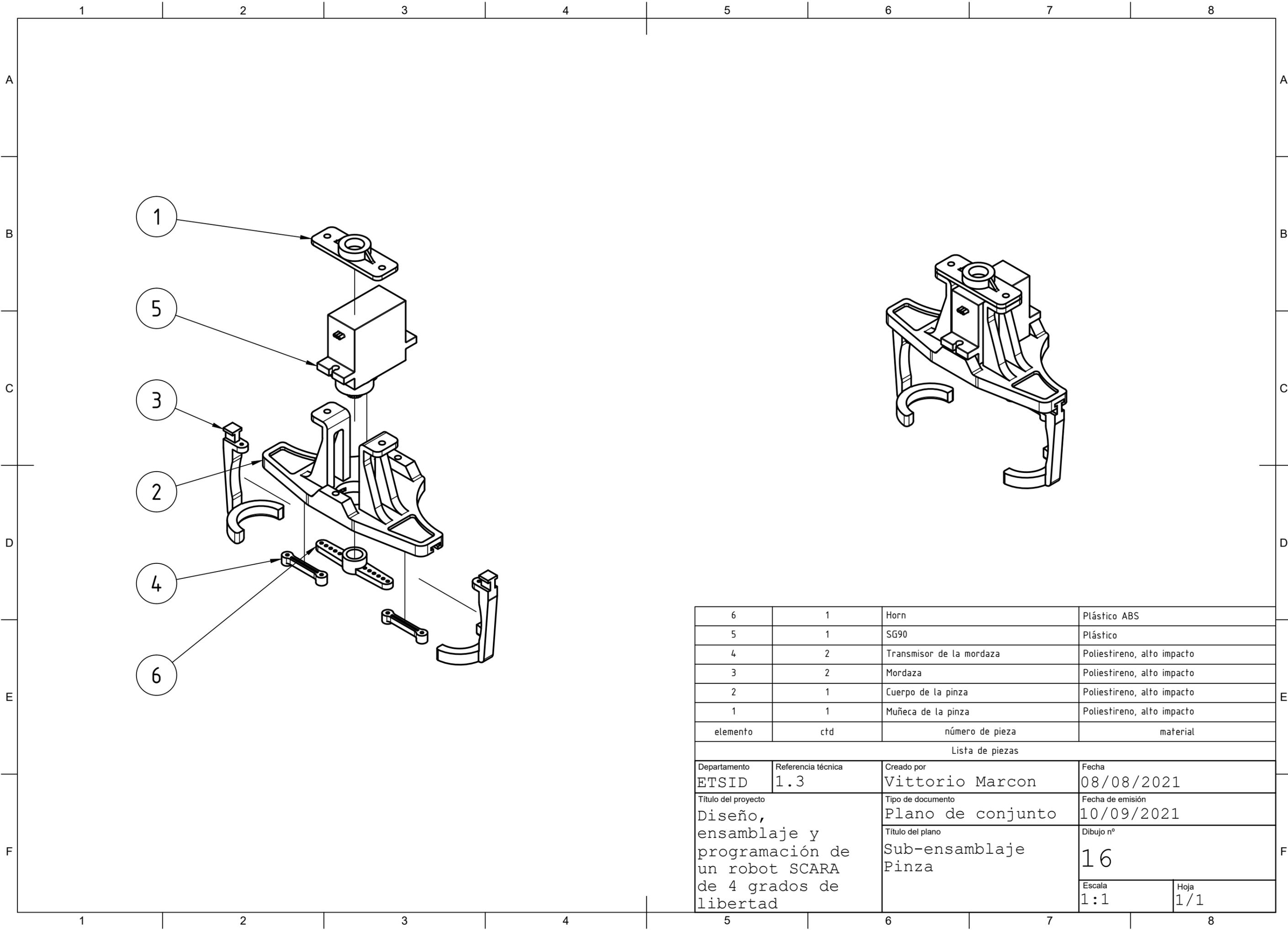
A-A (1:1)



Departamento ETSID	Referencia técnica 1.2.7	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 18/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Recubrimiento	Dibujo nº 14
		Escala 1:1	Hoja 1/1



Departamento ETSID	Referencia técnica 1.2.8	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 18/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Tapa	Dibujo nº 15
		Escala 1:1	Hoja 1/1



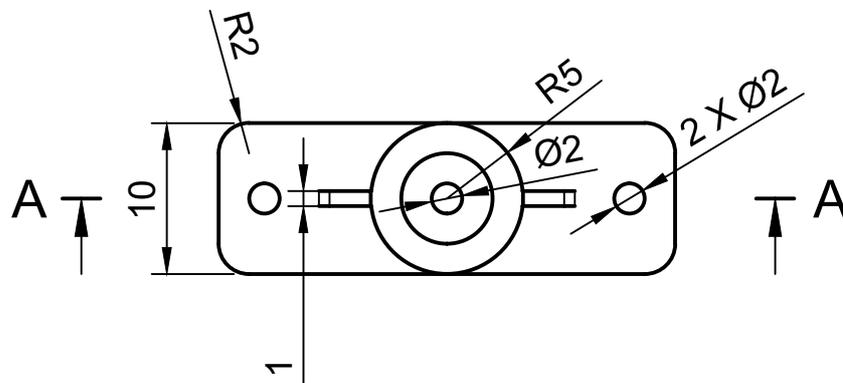
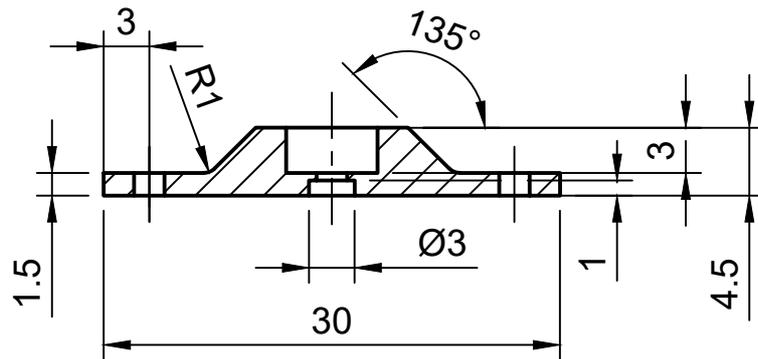
6	1	Horn	Plástico ABS
5	1	SG90	Plástico
4	2	Transmisor de la mordaza	Poliestireno, alto impacto
3	2	Mordaza	Poliestireno, alto impacto
2	1	Cuerpo de la pinza	Poliestireno, alto impacto
1	1	Muñeca de la pinza	Poliestireno, alto impacto
elemento	ctd	número de pieza	material

Lista de piezas

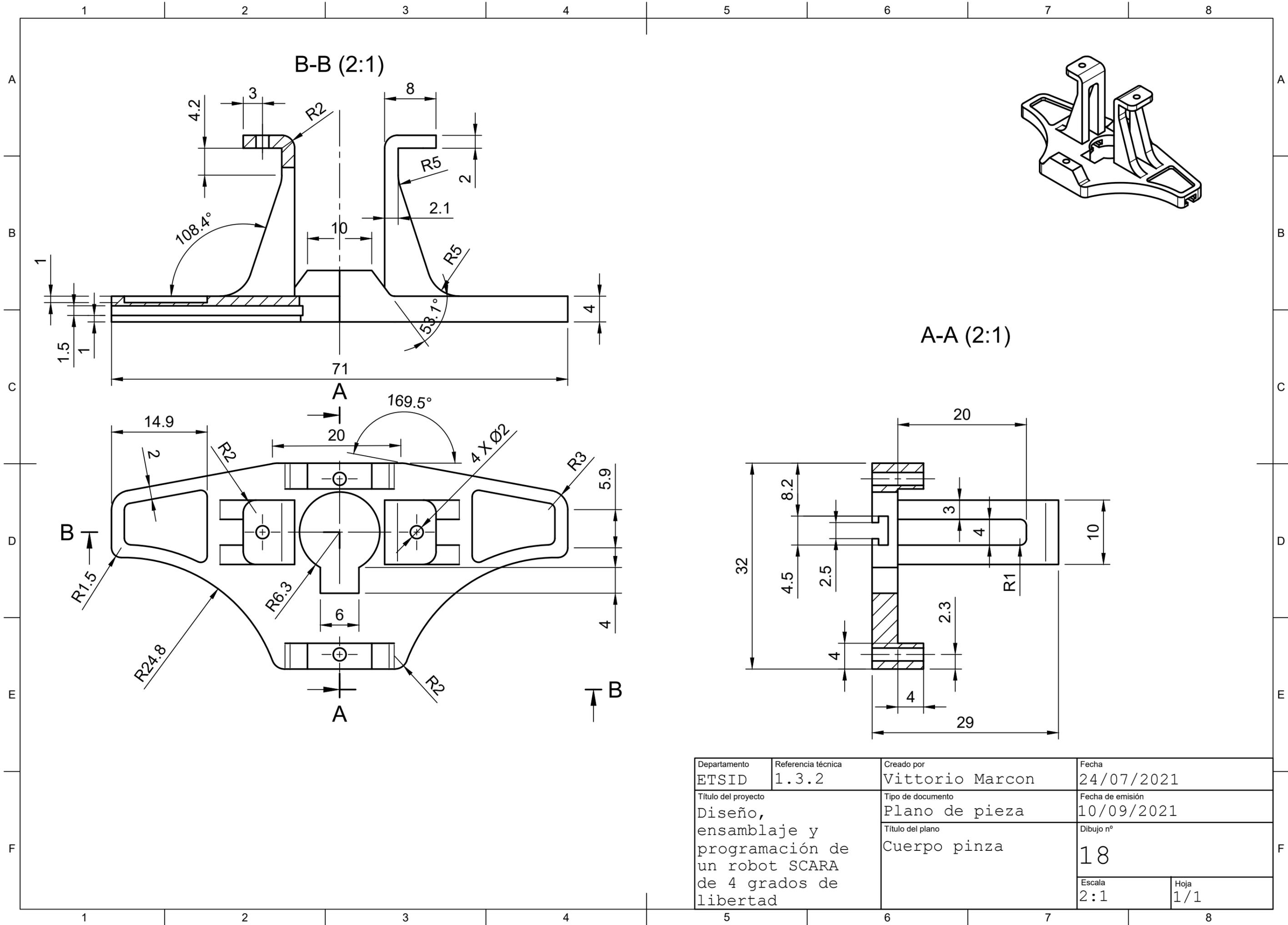
Departamento ETSID	Referencia técnica 1.3	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 08/08/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de conjunto	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Sub-ensamblaje Pinza	Dibujo nº 16
		Escala 1:1	Hoja 1/1



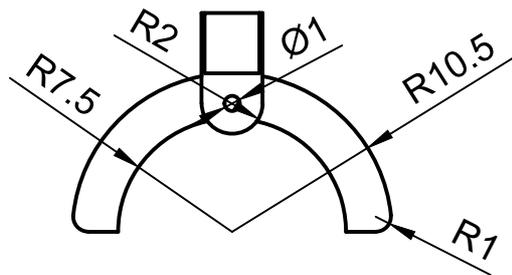
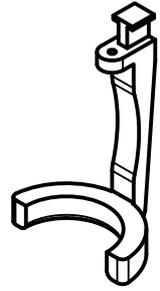
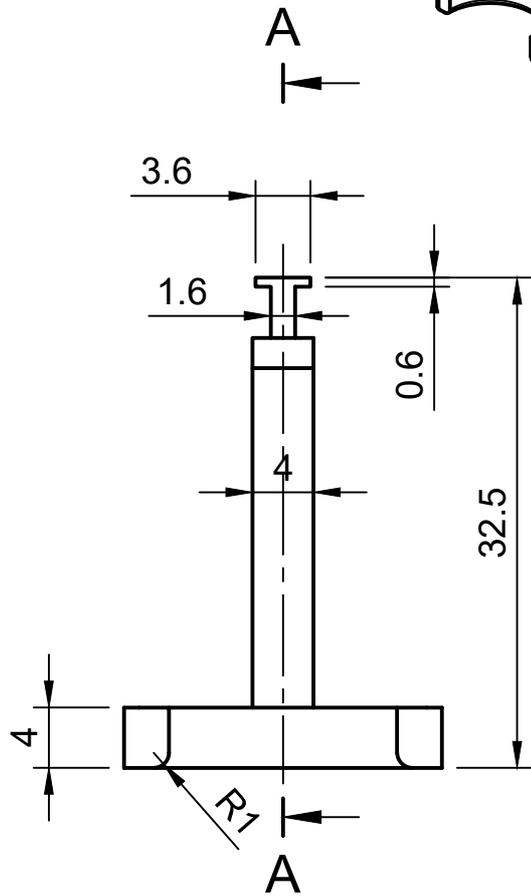
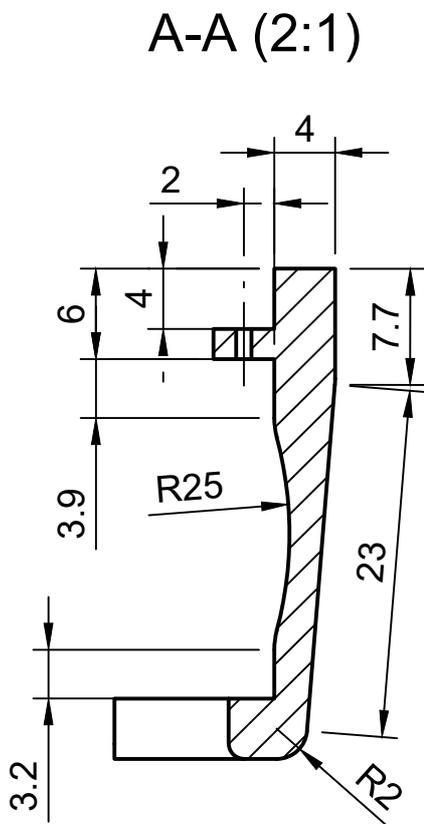
A-A (2:1)



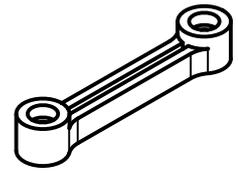
Departamento ETSID	Referencia técnica 1.3.1	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 17/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Muñeca pinza	Dibujo nº 17
		Escala 2:1	Hoja 1/1



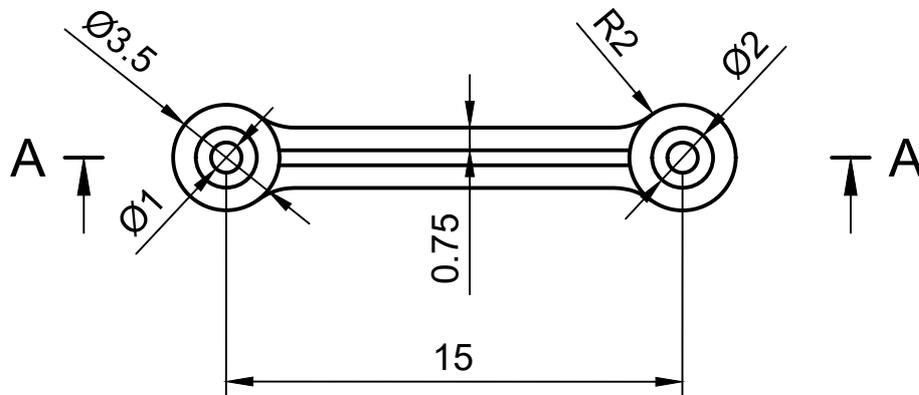
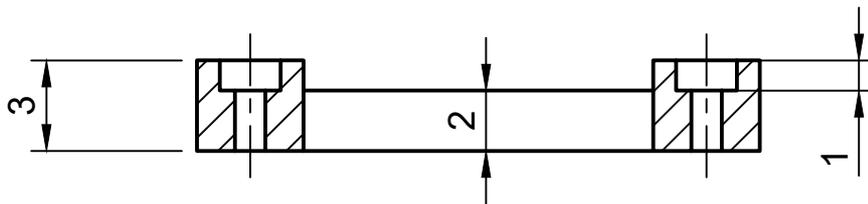
Departamento ETSID	Referencia técnica 1.3.2	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 24/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Cuerpo pinza	Dibujo nº 18
		Escala 2:1	Hoja 1/1



Departamento ETSID	Referencia técnica 1.3.3	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 18/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Mordaza	Dibujo nº 19
		Escala 2:1	Hoja 1/1



### A-A (4:1)



Departamento ETSID	Referencia técnica 1.3.4	Creado por Vittorio Marcon	Fecha 15/07/2021
Título del proyecto Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad		Tipo de documento Plano de pieza	Fecha de emisión 10/09/2021
		Título del plano Transmisor mordaza	Dibujo nº 20
		Escala 4:1	Hoja 1/1



### III. PLIEGO DE CONDICIONES

## 1. OBJETO

---

El presente pliego de condiciones describe la fabricación y el ensamblaje de las piezas que conforman el prototipo de robot tipo SCARA de 4 grados de libertad de diseño propio.

El ámbito de aplicación de este documento se extiende a la fabricación de todas las piezas y a la compra de todos los dispositivos electrónicos necesarios para completar el ensamblaje de la maqueta. En determinados casos se podrán adoptar soluciones diferentes a las exigidas en este documento, siempre y cuando se justifique la necesidad del cambio y no implique una disminución de los requerimientos mínimos de calidad detallados.

Quedan excluidos todos los trabajos relacionados con el diseño de otras herramientas diferentes a la pinza, así como de la instalación de sensores de proximidad o de seguridad necesarios para el uso profesional del robot.

## 2. CONDICIONES DE LOS MATERIALES

---

### 2.1. ENSAMBLAJE DE LA BASE

#### 2.1.1. Base

##### 2.1.1.1. Descripción

La base tendrá la función de unir rígidamente el robot a una superficie para fijar su posición, así como de soportar el peso de la propia estructura. Sus dimensiones generales son  $\varnothing$  145x30mm, fabricada mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 90.25g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.1.1 del Documento **Planos** de este proyecto.

##### 2.1.1.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de los orificios para los tornillos, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este.

#### 2.1.2. Soporte

##### 2.1.2.1. Descripción

El soporte tendrá la función de resistir las cargas producidas por el movimiento del robot, así como de unir el hombro a la base y transmitir a esta el peso de la estructura. Sus dimensiones generales son  $\varnothing$  50x100mm, fabricado mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 109.06g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.1.2 del Documento **Planos** de este proyecto.

##### 2.1.2.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de los orificios para los tornillos, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este.

### 2.1.3. Base del hombro

#### 2.1.3.1. Descripción

La base del hombro tendrá la función de unir el hombro al soporte, además de transmitir las cargas de los motores. Sus dimensiones generales son 70x50x23mm, fabricado mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 38.14g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.1.3 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.1.3.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de los orificios para los tornillos, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este.

### 2.1.4. Hombro

#### 2.1.4.1. Descripción

El hombro tendrá la función de servir de soporte de los 2 motores del brazo y de unir el brazo al ensamblaje de la base, además de transmitir el peso de estos elementos al resto de la estructura. Sus dimensiones generales son 70x50x106mm, fabricado mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 97.69g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.1.4 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.1.4.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de los orificios para los tornillos, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este.

## 2.2. ENSAMBLAJE DEL BRAZO

### 2.2.1. Eslabón 1

#### 2.2.1.1. Descripción

El eslabón 1 tendrá la función de transmitir el giro del motor inferior del soporte y proporcionar movimiento al brazo, además de unir el resto del brazo al ensamblaje de la base a través de la articulación entre los eslabones 1 y 2. Sus dimensiones generales son 125x30x12mm, fabricado mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 23.046g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.2.1 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.2.1.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión del orificio para el tornillo y del orificio que conecta los eslabones 1 y 2, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este. Por último, se comprobará que exista un juego suficiente que permita el giro en la articulación.

### 2.2.2. Eslabón 2

#### 2.2.2.1. Descripción

El eslabón 2 tendrá la función de proporcionar movimiento al brazo a través del giro transmitido por las varillas, además de unir el resto del brazo al ensamblaje de la base a través de la articulación entre los eslabones 1 y 2 y el par prismático entre los eslabones 2 y 3. Sus dimensiones generales son 188.3x90x17mm, fabricado mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 87.86g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.2.2 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.2.2.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de los orificios para los tornillos y del orificio que conecta los eslabones 1 y 2 y del orificio que conecta los eslabones 2 y 3, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este. Por último, se comprobará que

exista un juego suficiente que permita el giro en la articulación y el movimiento en la cremallera.

### 2.2.3. Varilla

#### 2.2.3.1. Descripción

Las varillas tendrán la función de transmitir el movimiento del motor al eslabón 2. Sus dimensiones generales son 110x10x5mm, fabricadas mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 2.078g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.2.3 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.2.3.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de sus orificios, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este. Por último, se comprobará que exista un juego suficiente que permita el giro en las articulaciones.

### 2.2.4. Transmisor de las varillas

#### 2.2.4.1. Descripción

El transmisor de las varillas tendrá la función de unir el eje del motor a las varillas, transmitiendo a su vez el giro de este. Sus dimensiones generales son  $\varnothing$  25x10mm, fabricada mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 1.55g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.2.4 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.2.4.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de los orificios para los tornillos, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este. Por otro lado, se realizará una revisión de los salientes, y se comprobará que exista un juego suficiente que permita el giro en las articulaciones.

### 2.2.5. Eslabón 3

#### 2.2.5.1. Descripción

El eslabón 3 tendrá la función de transmitir el movimiento de la cremallera para subir y bajar la herramienta, además de unir la herramienta con el resto de la maqueta y de proporcionar el giro de esta a través del motor colocado en el extremo. Sus dimensiones generales son 33.5x15x117.5mm, fabricado mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 18.72g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.2.5 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.2.5.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de los orificios para los tornillos, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este. Por último, se comprobará que exista un juego suficiente que permita el movimiento en la cremallera.

### 2.2.6. Engranaje

#### 2.2.6.1. Descripción

El engranaje tendrá la función de transmitir el movimiento del motor a la cremallera. Sus dimensiones generales son  $\varnothing 15.5 \times 6$ mm, fabricado mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 0.62g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.2.6 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.2.6.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión del orificio para el tornillo, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este.

## 2.2.7. Recubrimiento

### 2.2.7.1. Descripción

El recubrimiento tendrá la función de proteger los componentes que se encuentran en el extremo del eslabón 3 junto a las respectivas relaciones entre estos, además de proteger al usuario frente a posibles accidentes. Sus dimensiones generales son 77x90x27.5mm, fabricado mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 19.51g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.2.7 del Documento **Planos** de este proyecto.

### 2.2.7.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de sus orificios para los tornillos, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este.

## 2.2.8. Tapa

### 2.2.8.1. Descripción

La tapa tendrá la función de proteger los componentes que se encuentran en el extremo del eslabón 3 junto a las respectivas relaciones entre estos, además de proteger al usuario frente a posibles accidentes. Por otro lado, permite fijar la trayectoria del eslabón 3, impidiendo que se tambalee o se salga de esta. Sus dimensiones generales son 77x90x3mm, fabricadas mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 16.59g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.2.8 del Documento **Planos** de este proyecto.

### 2.2.8.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de sus orificios, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este. Por último, se comprobará que exista un juego suficiente que permita el giro en las articulaciones.

## 2.3. ENSAMBLAJE PINZA

### 2.3.1. Muñeca de la pinza

#### 2.3.1.1. Descripción

La muñeca de la pinza tendrá la función de unir el ensamblaje de la pinza con el motor situado en el extremo del eslabón 3, de forma que la pinza pueda girar sobre su eje. Sus dimensiones generales son 30x10x4.5mm, fabricada mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 0.62g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.3.1 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.3.1.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de sus orificios para los tornillos, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este.

### 2.3.2. Cuerpo de la pinza

#### 2.3.2.1. Descripción

El cuerpo de la pinza tendrá la función de ser la estructura sobre la que se van a ensamblar el resto de los componentes que forman la pinza. Sus dimensiones generales son 71x32x29mm, fabricado mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 7.12g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.3.2 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.3.2.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de sus orificios para los tornillos, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este. Por último, se comprobará que exista un juego suficiente que permita el deslizamiento de las mordazas sobre los carriles.

### 2.3.3. Mordaza

#### 2.3.3.1. Descripción

Las mordazas tendrán la función de sujetar el objeto que se desee coger con la pinza. Sus dimensiones generales son 14.5x21x33mm, fabricadas mediante poliestireno de alto impacto y con un peso de 0.76g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.3.3 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.3.3.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de sus orificios para los tornillos, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este. Por último, se comprobará que exista un juego suficiente que permita el deslizamiento de las mordazas sobre los carriles.

### 2.3.4. Transmisor de la mordaza

#### 2.3.4.1. Descripción

Los transmisores de las mordazas tendrán la función de transmitir el giro del motor a las mordazas. Sus dimensiones generales son 18.5x3.5x3mm, fabricadas poliestireno de alto impacto y con un peso de 0.089g. Las dimensiones específicas de este elemento se encuentran detalladas en el plano 1.3.4 del Documento **Planos** de este proyecto.

#### 2.3.4.2. Control de calidad

Una vez fabricada la pieza, se deberá realizar una medición de esta y compararla con los componentes que se encuentren directamente ensamblados a la misma. Si la unión resultante no es correcta, la pieza será descartada. Además, se realizará una revisión de sus orificios para los tornillos, que consistirá en observar si existe alguna grieta o zona irregular en la superficie del orificio o cerca de este.

## 3. CONDICIONES DE LA EJECUCIÓN

---

### 3.1. DESCRIPCIÓN

Todos los elementos descritos anteriormente se fabricarán única y exclusivamente mediante la impresión 3D. El entorno de trabajo se encontrará limpio, para evitar la contaminación de las piezas durante su fabricación con partículas que puedan alterar su funcionamiento o sus características. Una vez realizada la impresión de las piezas, se procederá al montaje de estas.

Se ensamblará la **base del hombro** con el **soporte** mediante 4 tornillos autoperforantes de métrica 3. Esto se repetirá para ensamblar la **base** al extremo inferior del **soporte**.

Se ensamblarán los dos motores **MG996R** en el **hombro**, y se hará pasar el cable del motor inferior por el orificio de la pieza. Para cada uno de los motores se utilizarán 4 tornillos autoperforantes de métrica 2 y 4 almohadillas de goma, 1 en cada tornillo, que absorberán las vibraciones de los motores. Las especificaciones y las condiciones de trabajo de los motores MG996R se encuentran en el **Anexo 1**.

Se ensamblará el **hombro** a la **base del hombro** mediante 5 tornillos autoperforantes de métrica 2, obteniendo finalmente el **ensamblaje de la base**.

Se ensamblará el **eslabón 1** al cabezal externo del motor inferior mediante 4 tornillos autoperforantes de métrica 1. Esto se repetirá para ensamblar el **transmisor de las varillas** al cabezal externo del motor superior.

Se ensamblará el **eslabón 1** al **eslabón 2** mediante 1 tornillo de métrica 5 junto con 2 arandelas y una tuerca.

Se ensamblarán las **2 varillas** al **eslabón 2** y al **transmisor de las varillas**. Para cada varilla se emplearán 2 tornillos autoperforantes de métrica 2, 1 para cada extremo, junto con 2 arandelas que impidan el escape de las varillas.

Se ensamblará el **engranaje** al eje de un motor **SG90** mediante 1 tornillo de métrica 1.5. Además, se utilizará un adhesivo en la superficie de contacto del engranaje con el eje del motor para reforzar la unión entre los dos componentes. Las especificaciones y las condiciones de trabajo de los motores SG90 se encuentran en el **Anexo 1**.

Se ensamblará el motor anterior al **eslabón 2** mediante 2 tornillos autoperforantes de métrica 2. Se colocará el **engranaje** en la ranura del **eslabón 2**.

Se ensamblará el **recubrimiento** al **eslabón 2** mediante 4 tornillos autoperforantes de métrica 2. Después, se ensamblará la **tapa** al **recubrimiento** mediante 4 tornillos autoperforantes de métrica 2.

Se ensamblará un motor **SG90** al **eslabón 3** mediante 2 tornillos autoperforantes de métrica 2.

## Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

Se ensamblará la **muñeca de la pinza** al eje del motor del **eslabón 3** mediante 1 tornillo de métrica 1.5.

Se hará pasar la cremallera del **eslabón 3** por los orificios del **eslabón 2** y la **tapa**, de forma que se cree un mecanismo con el **engranaje** y obteniendo finalmente el **ensamblaje del brazo**.

Los dos ensamblajes anteriores se unirán ensamblando el cabezal situado en el **eslabón 1** al motor inferior del **hombro** y el cabezal situado en el **transmisor de las varillas** al motor superior del **hombro**. Se emplearán 2 tornillos de métrica 3, 1 para cada uno de los motores, obteniendo el **ensamblaje base-brazo**.

Se ensamblará un motor **SG90** al **cuerpo de la pinza** mediante 2 tornillos autopercutores de métrica 2. Se harán pasar las **2 mordazas** a través de las ranuras del **cuerpo de la pinza**.

Se ensamblarán los **2 transmisores de las mordazas** a las **mordazas** y al cabezal externo del motor. A su vez, se ensamblará el cabezal externo al eje del motor mediante 1 tornillo de métrica 1.5. Para cada **transmisor de las mordazas** se emplearán 2 tornillos autopercutores de métrica 1, 1 para cada extremo.

Se ensamblará el **cuerpo de la pinza** a la **muñeca de la pinza** mediante 2 tornillos autopercutores de métrica 2, obteniendo finalmente el **ensamblaje de la pinza** junto al **ensamblaje completo del robot**.

### 3.2. CONTROL DE CALIDAD

Se comprobará la cantidad de material empleado durante el proceso de fabricación de las piezas. Se realizará una inspección del ensamblaje para verificar que las dimensiones generales corresponden con las de los planos y que no se han formado desperfectos durante el proceso de ensamblaje.

## 4. PRUEBAS DE SERVICIO

---

Una vez terminado el ensamblaje del robot, se comprobará el correcto funcionamiento de los componentes que lo conforman. A su vez, antes de ponerlo en funcionamiento, se realizará una lista de comprobaciones que garanticen el buen estado del ensamblaje para evitar que se puedan provocar fallos o daños en los elementos. La lista de comprobaciones viene recogida en la **Tabla 3**.

### COMPROBACIONES PRE-ENCENDIDO DEL ROBOT

Confirmar el correcto apriete de tornillos de todo el ensamblaje
Inspección de las piezas por la posible generación de grietas
Verificar que el juego en las uniones móviles del robot es el apropiado
Asegurar la correcta conexión de los componentes electrónicos

*Tabla 3: Lista de comprobaciones previas al funcionamiento del robot*

Una vez realizadas las comprobaciones, se pondrá en marcha el prototipo para asegurar que funciona correctamente y no existen vibraciones producidas por el funcionamiento de los motores. Para ello, se iniciará el programa de comprobación de movimiento, que se encuentra en el **Anexo 3**.

Una vez finalizado el proceso de comprobación de movimiento, se volverán a revisar las comprobaciones de la **Tabla 3** para comprobar que no se han sufrido daños.



## IV. PRESUPUESTO

## 1. PRESENTACIÓN

---

A lo largo de este documento, se expone el presupuesto que se ha utilizado para poder llevar a cabo el proyecto. A su vez, el presupuesto se divide en 4 subapartados, que recogen todos los gastos necesarios: componentes electrónicos, tornillería, mano de obra y material de trabajo, y el presupuesto total.

Por otro lado, pese a que no hay que ignorar el uso de software para poder realizar el proyecto en su totalidad, no se ha incluido en el documento dado que se trata de software gratuito, versiones estudiantiles o versiones de prueba.

Del mismo modo, no se han añadido los gastos de la impresión por el hecho de que las piezas se han fabricado de forma gratuita a través de la propia universidad.

## 2. PRESUPUESTO

### 2.1. COMPONENTES ELECTRÓNICOS

A continuación, se muestra la lista de componentes electrónicos utilizados para construir el conexionado del robot. El envío de los componentes ha sido gratuito, por lo que los gastos de envío no se incluyen en el presupuesto.

Código	Ud.	Descripción	Precio unit.	Cant.	Parcial
c1	ud.	Arduino UNO R3	20,00 €	1	20,00 €
c2	ud.	Cable USB 2,0	4,54 €	1	4,54 €
c3	ud.	Placa de pruebas	4,79 €	1	4,79 €
c4	ud.	Servomotor SG90	2,75 €	3	8,25 €
c5	ud.	Servomotor MG996R	3,92 €	2	7,84 €
c6	ud.	Fuente de alimentación FAC 363B	61,15 €	1	61,15 €
c7	ud.	Cables puente macho-macho	0,10 €	19	1,90 €

**Tabla 4:** Componentes electrónicos

### 2.2. TORNILLERÍA

A continuación, se muestra la lista de elementos de tornillería utilizados para el ensamblaje del robot. A su vez, estos elementos se encuentran descritos en el documento **Pliego de Condiciones** de este proyecto.

Código	Ud.	Descripción	Precio unit.	Cant.	Parcial
t1	ud.	Tornillo autoperforante M1	0,01 €	10	0,06 €
t2	ud.	Tornillo M1.5	0,01 €	3	0,02 €
t3	ud.	Tornillo autoperforante M2	0,01 €	33	0,19 €
t4	ud.	Tornillo autoperforante M3	0,03 €	10	0,25 €
t5	ud.	Tornillo M5	0,07 €	1	0,07 €
t6	ud.	Arandela M2	0,08 €	4	0,33 €
t7	ud.	Arandela M5	0,08 €	2	0,17 €
t8	ud.	Tuerca M5	0,07 €	1	0,07 €
t9	ud.	Almohadilla de goma	0,05 €	8	0,40 €
t10	ud.	Adhesivo de alto contacto	1,65 €	1	1,65 €

**Tabla 5:** Tornillería

### 2.3. MANO DE OBRA Y MATERIAL DE TRABAJO

A continuación, se muestran los componentes que forman parte del equipo necesario para la realización del proyecto. A su vez, se muestra el gasto que suponen a través de una amortización equivalente al 10% de su valor total.

Por otro lado, se muestra el gasto producido por las horas de trabajo invertidas en el proyecto, teniendo en cuenta una media de aproximadamente 2 horas diarias durante 5 meses.

Código	Ud.	Descripción	Precio unit.	Cant.	Parcial
e1	h	Mano de obra (ingeniero junior)	20,00 €	300	6.000,00 €
e2	ud.	Amortización ordenador	74,38 €	1	74,38 €
e3	ud.	Amortización teclado	8,68 €	1	8,68 €
e4	ud.	Amortización ratón	1,65 €	1	1,65 €
e5	ud.	Amortización tableta gráfica	3,31 €	1	3,31 €
e6	ud.	Amortización monitor	8,68 €	1	8,68 €

*Tabla 6: Mano de obra y material de trabajo*

### 2.4. PRESUPUESTO TOTAL

A continuación, se muestra la suma de los gastos producidos por los elementos mostrados anteriormente. A su vez, se añade el IVA correspondiente a este valor y un 20% de beneficios adicionales.

<b>COSTE DE EJECUCIÓN</b>	6.208,37 €
<b>BENEFICIO (20%)</b>	1.241,67 €
<b>IVA (21%)</b>	1.303,76 €
<b>PRESUPUESTO FINAL</b>	<b>8.753,80 €</b>

*Tabla 7: Presupuesto final*



## V. ANEXOS

## 1. ESPECIFICACIONES DE LOS MOTORES

---

Para el ensamblaje del robot, se utilizarán 2 servomotores MG996R y 3 servomotores SG90. En la **Tabla 4** se recogen las características de los motores mencionados.

Datos	MG996R	SG90
Peso (g)	55	9
Dimensiones (mm)	40 x 19 x 43	22.2 x 11.8 x 31
Velocidad a 4.8V (rad/s)	6.16 o 60 grados cada 0.17s	10.47 o 60 grados cada 0.1s
Velocidad a 6V (rad/s)	8.06 o 60 grados cada 0.13s	-
Par de parada a 4.8V (kg·cm)	13	1.8
Par de parada a 6V (kg·cm)	15	-
Rango de giro (grados)	180	180

**Tabla 8:** Especificaciones de los motores

Todos los motores del robot trabajarán a 4.8V, por lo que se tendrán en cuenta los datos correspondientes a dicha tensión.

## 2. RESOLUCIÓN DE LAS MATRICES DE PASO EN MATLAB

---

A continuación, se muestra el código escrito en Matlab para la resolución de las matrices de paso pertenecientes al análisis cinemático directo. A su vez, se observan las matrices que se han obtenido como resultado.

En primer lugar, se definen los parámetros  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  y  $q_4$  a través del comando "syms", de forma que el programa se pueda permitir la obtención de las matrices de paso sin conocer el valor de estas variables. Después, se definen las matrices de paso como  $T_{01}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{23}$  y  $T_{34}$ . Por último, se multiplican en orden las 4 matrices, obteniendo  $T_{04}$  y se sustituyen los valores de los parámetros para la posición elegida a través del comando "subs". Para simplificar los resultados obtenidos, se utiliza el comando "double".

Código utilizado:

```
>> syms q1 q2 q3 q4
```

```
>> T_01 = trotx(q1,'deg')*transl(0,0,0.012)*transl(0.1,0,0)*trotx(0,'deg')
```

T\_01 =

```
[ cos((pi*q1)/180), -sin((pi*q1)/180), 0, cos((pi*q1)/180)/10]
```

```
[ sin((pi*q1)/180), cos((pi*q1)/180), 0, sin((pi*q1)/180)/10]
```

```
[      0,      0, 1,      3/250]
```

```
[      0,      0, 0,      1]
```

```
>> T_12 = trotx(q2,'deg')*transl(0,0,0)*transl(0.15,0,0)*trotx(180,'deg')
```

T\_12 =

```
[ cos((pi*q2)/180), sin((pi*q2)/180),
(4967757600021511*sin((pi*q2)/180))/40564819207303340847894502572032,
(3*cos((pi*q2)/180))/20]
```

```
[ sin((pi*q2)/180), -cos((pi*q2)/180), -
(4967757600021511*cos((pi*q2)/180))/40564819207303340847894502572032,
(3*sin((pi*q2)/180))/20]
```

## Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

```
[ 0, 4967757600021511/40564819207303340847894502572032,  
-1, 0]
```

```
[ 0, 0, 0,  
1]
```

```
>> T_23 = trotz(0,'deg')*transl(0,0,q3)*transl(0,0,0)*trotx(0,'deg')
```

```
T_23 =
```

```
[ 1, 0, 0, 0]
```

```
[ 0, 1, 0, 0]
```

```
[ 0, 0, 1, q3]
```

```
[ 0, 0, 0, 1]
```

```
>> T_34 = trotz(q4,'deg')*transl(0,0,0.0597)*transl(0,0,0)*trotx(0,'deg')
```

```
T_34 =
```

```
[ cos((pi*q4)/180), -sin((pi*q4)/180), 0, 0]
```

```
[ sin((pi*q4)/180), cos((pi*q4)/180), 0, 0]
```

```
[ 0, 0, 1, 597/10000]
```

```
[ 0, 0, 0, 1]
```

```
>> T_04=T_01*T_12*T_23*T_34
```

```
T_04 =
```

```
[ cos((pi*q4)/180)*(cos((pi*q1)/180)*cos((pi*q2)/180) -  
sin((pi*q1)/180)*sin((pi*q2)/180)) +  
sin((pi*q4)/180)*(cos((pi*q1)/180)*sin((pi*q2)/180) +  
cos((pi*q2)/180)*sin((pi*q1)/180)), +  
cos((pi*q4)/180)*(cos((pi*q1)/180)*sin((pi*q2)/180) +  
cos((pi*q2)/180)*sin((pi*q1)/180)) -
```

Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

$$\begin{aligned} & \sin((\pi*q4)/180)*(\cos((\pi*q1)/180)*\cos((\pi*q2)/180)) - \\ & \sin((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180)), \\ & (4967757600021511*\cos((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180))/40564819207303340847894 \\ & 502572032 + \\ & (4967757600021511*\cos((\pi*q2)/180)*\sin((\pi*q1)/180))/40564819207303340847894 \\ & 502572032, \cos((\pi*q1)/180)/10 + (3*\cos((\pi*q1)/180)*\cos((\pi*q2)/180))/20 + \\ & (2965751287212842067*\cos((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180))/40564819207303340847 \\ & 8945025720320000 + \\ & (2965751287212842067*\cos((\pi*q2)/180)*\sin((\pi*q1)/180))/40564819207303340847 \\ & 8945025720320000 + \\ & q3*((4967757600021511*\cos((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180))/4056481920730334084 \\ & 7894502572032 + \\ & (4967757600021511*\cos((\pi*q2)/180)*\sin((\pi*q1)/180))/40564819207303340847894 \\ & 502572032) - (3*\sin((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180))/20] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [ & \cos((\pi*q4)/180)*(\cos((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180)) + \\ & \cos((\pi*q2)/180)*\sin((\pi*q1)/180)) - \\ & \sin((\pi*q4)/180)*(\cos((\pi*q1)/180)*\cos((\pi*q2)/180)) - \\ & \sin((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180)), - \\ & \cos((\pi*q4)/180)*(\cos((\pi*q1)/180)*\cos((\pi*q2)/180)) - \\ & \sin((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180)) - \\ & \sin((\pi*q4)/180)*(\cos((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180)) + \\ & \cos((\pi*q2)/180)*\sin((\pi*q1)/180)), + \\ & (4967757600021511*\sin((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180))/40564819207303340847894 \\ & 502572032 - \\ & (4967757600021511*\cos((\pi*q1)/180)*\cos((\pi*q2)/180))/4056481920730334084789 \\ & 4502572032, \sin((\pi*q1)/180)/10 - \\ & (2965751287212842067*\cos((\pi*q1)/180)*\cos((\pi*q2)/180))/4056481920730334084 \\ & 78945025720320000 + (3*\cos((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180))/20 + \\ & (3*\cos((\pi*q2)/180)*\sin((\pi*q1)/180))/20 - \\ & q3*((4967757600021511*\cos((\pi*q1)/180)*\cos((\pi*q2)/180))/4056481920730334084 \\ & 7894502572032 - \\ & (4967757600021511*\sin((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180))/40564819207303340847894 \\ & 502572032) + \\ & (2965751287212842067*\sin((\pi*q1)/180)*\sin((\pi*q2)/180))/40564819207303340847 \\ & 8945025720320000] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [ & (4967757600021511*\sin((\pi*q4)/180))/40564819207303340847894502572032, \\ & (4967757600021511*\cos((\pi*q4)/180))/40564819207303340847894502572032, \\ & -1, \\ & -q3 - 477/10000] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [ & 0, \\ & 0, \\ & 1] \end{aligned}$$

Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

```
>> double(subs(T_04,[q1,q2,q3,q4],[0,0,0.0449,0]))
```

**ans =**

```
1.0000    0    0  0.2500  
0 -1.0000 -0.0000 -0.0000  
0  0.0000 -1.0000 -0.0926  
0    0    0  1.0000
```

### 3. PRIMER PROGRAMA. COMPROBACIÓN DE MOVIMIENTO

---

```
#include <Servo.h> //Se incluye la librería de los servomotores
```

```
Servo servo1; //Se define servomotor del eslabón 1
```

```
Servo servo2; //Se define servomotor del eslabón 2
```

```
Servo servo3; //Se define servomotor del eslabón 3
```

```
Servo servo4; //Se define servomotor de la muñeca
```

```
Servo servo5; //Se define servomotor de la pinza
```

```
int pos1 = 90; //Posición del servo del eslabón 1
```

```
int pos2 = 90; //Posición del servo del eslabón 2
```

```
int pos3 = 0; //Posición del servo del eslabón 3
```

```
int pos4 = 150; //Posición del servo de la muñeca
```

```
int pos5 = 0; //Posición del servo de la pinza
```

```
void setup() {
```

```
  Serial.begin(9600); //Inicia la comunicación con el ordenador
```

```
  servo1.attach(7); //Se enlaza el servomotor 1 con el pin 7
```

```
  servo2.attach(8); //Se enlaza el servomotor 2 con el pin 8
```

```
  servo3.attach(9); //Se enlaza el servomotor 3 con el pin 9
```

```
  servo4.attach(10); //Se enlaza el servomotor 4 con el pin 10
```

```
  servo5.attach(11); //Se enlaza el servomotor 5 con el pin 11
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
  servo1.write(pos1); //Se coloca el servomotor 1 en su posición de reposo
```

```
  servo2.write(pos2); //Se coloca el servomotor 2 en su posición de reposo
```

```
  servo3.write(pos3); //Se coloca el servomotor 3 en su posición de reposo
```

```
  servo4.write(pos4); //Se coloca el servomotor 4 en su posición de reposo
```

Diseño, ensamblaje y programación de un robot SCARA de 4 grados de libertad

```
servo5.write(pos5); //Se coloca el servomotor 5 en su posición de reposo
```

```
Serial.print("Comprobación de los motores.\n Espere 5 segundos para comprobar  
Eslabón 1.\n"); //Mensaje de texto. \n actúa como una separación de líneas
```

```
delay(5000); //Pausa de 5 segundos
```

```
servo1.write(pos1+20); //Mueve el eslabón 1
```

```
delay(1500); //Pausa de 1.5 segundos
```

```
servo1.write(pos1); //Mueve el eslabón 1 a reposo
```

```
delay(1000); //Pausa de 1 segundo
```

```
Serial.print("Eslabón 1 comprobado.\n Espere 5 segundos para comprobar Eslabón  
2.\n");
```

```
delay(5000);
```

```
servo2.write(pos2-20); //Mueve el eslabón
```

```
delay(1500);
```

```
servo2.write(pos2); //Mueve el eslabón 2 a reposo
```

```
delay(1000);
```

```
Serial.print("Eslabón 2 comprobado.\n Espere 5 segundos para comprobar Eslabón  
3.\n");
```

```
delay(5000);
```

```
servo3.write(pos3+50); //Mueve el eslabón 3
```

```
delay(1500);
```

```
servo3.write(pos3); //Mueve el eslabón 3 a reposo
```

```
delay(1000);
```

```
Serial.print("Eslabón 3 comprobado.\n Espere 5 segundos para comprobar  
Muñeca.\n");
```

```
delay(5000);
```

```
servo4.write(pos4+20); //Mueve la muñeca
```

```
delay(1500);
```

```
servo4.write(pos4); //Mueve la muñeca a reposo
```

```
delay(1000);
```

```
Serial.print("Muñeca comprobada.\n Espere 5 segundos para comprobar Pinza.\n");  
delay(5000);  
servo5.write(pos5+15); //Mueve la pinza  
delay(1500);  
servo5.write(pos5); //Mueve la pinza a reposo  
delay(1000);  
  
Serial.print("Comprobación completa. Reinicio en 60 segundos");  
delay(60000); //Pausa de 60 segundos  
}
```

## 4. SEGUNDO PROGRAMA. SIMULACIÓN

---

```
#include <Servo.h> //Se incluye la librería de los servomotores

Servo servo1; //Se define servomotor del eslabón 1
Servo servo2; //Se define servomotor del eslabón 2
Servo servo3; //Se define servomotor del eslabón 3
Servo servo4; //Se define servomotor de la muñeca
Servo servo5; //Se define servomotor de la pinza

int pos1 = 90; //Posición del servo del eslabón 1
int pos2 = 90; //Posición del servo del eslabón 2
int pos3 = 0; //Posición del servo del eslabón 3
int pos4 = 150; //Posición del servo de la muñeca
int pos5 = 0; //Posición del servo de la pinza

int num=0; //Variable de número de veces
int i=0; //Valor que irá incrementándose hasta igualar el número de veces
int a=0; //Variable que impide la repetición de un mensaje
int b=0; //Variable que impide la repetición de un mensaje
String words; //variable para almacenar un conjunto de caracteres

void setup() {
  Serial.begin(9600); //Inicia la comunicación con el ordenador

  servo1.attach(7); //Se enlaza el servomotor 1 con el pin 7
  servo2.attach(8); //Se enlaza el servomotor 2 con el pin 8
  servo3.attach(9); //Se enlaza el servomotor 3 con el pin 9
  servo4.attach(10); //Se enlaza el servomotor 4 con el pin 10
  servo5.attach(11); //Se enlaza el servomotor 5 con el pin 11
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
servo1.write(pos1); //Se coloca el servomotor 1 en su posición de reposo
```

```
servo2.write(pos2); //Se coloca el servomotor 2 en su posición de reposo
```

```
servo3.write(pos3); //Se coloca el servomotor 3 en su posición de reposo
```

```
servo4.write(pos4); //Se coloca el servomotor 4 en su posición de reposo
```

```
servo5.write(pos5); //Se coloca el servomotor 5 en su posición de reposo
```

```
delay(1000);
```

```
if(a==0){ //Se realiza solamente si a vale 0
```

```
Serial.print("Simulación de tarea de desplazamiento.\n Indique el número de veces  
que se quiera realizar.\n");
```

```
a=1; //a vale 1 y no se repite el mensaje
```

```
}
```

```
while(Serial.available()){ //Lee el valor enviado al Puerto Serie
```

```
delay(100); //Pausa de 0.1 segundos
```

```
char c = Serial.read(); //Lee y almacena los caracteres
```

```
words += c; //Convierte los caracteres en una cadena de caracteres o "string"
```

```
}
```

```
if(words.length()>0){ //Se realiza solamente si se ha introducido un valor
```

```
num=words.toInt(); //Convierte la cadena de caracteres en un número entero
```

```
if(b==0){ //Se realiza solamente si b vale 0
```

```
Serial.print("Ha elegido ");
```

```
Serial.print(num);
```

```
Serial.print(" veces.\n");
```

```
delay(1000);
```

```
Serial.print("Comenzando simulación.\n");
```

```
b=1; //b vale 1 y no se repite el mensaje  
}  
delay(1000);  
  
while(i<num){ //Se repite hasta que i sea equivalente al valor introducido  
Serial.print("Iniciando operación número ");  
Serial.print(i+1);  
Serial.print(".\n");  
delay(1000);  
Serial.print("Moviendo el brazo a la posición deseada...\n");  
servo1.write(pos1+20); //Mueve el eslabón 1  
servo2.write(pos2-30); //Mueve el eslabón 2  
delay(1000);  
servo4.write(pos4-50); //Mueve la muñeca  
delay(1000);  
servo3.write(pos3+180); //Baja el eslabón 3  
delay(1000);  
servo5.write(pos5+30); //Cierra la pinza  
delay(1000);  
Serial.print("Desplazando a nueva posición...\n");  
servo3.write(pos3); //Sube el eslabón 3  
delay(1000);  
servo1.write(pos1-20); //Mueve el eslabón 1  
servo2.write(pos2+30); //Mueve el eslabón 2  
delay(1000);  
servo4.write(pos4); //Mueve la muñeca  
delay(1000);  
servo3.write(pos3+180); //Baja el eslabón 3  
delay(1000);  
servo5.write(pos5); //Abre la pinza
```

```
delay(1000);  
servo3.write(pos3); //Sube el eslabón 3  
Serial.print("Tarea completada.\n");  
delay(1000);  
i=i+1; //Aumenta el valor de i en 1 unidad  
}  
  
servo1.write(pos1);  
servo2.write(pos2);  
servo3.write(pos3);  
servo4.write(pos4);  
servo5.write(pos5);  
a=0;  
b=0;  
i=0;  
Serial.print("Simulación completada. 60 segundos hasta su reinicio.\n");  
delay(60000);  
}  
}
```