



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Diseño y construcción de un brazo robótico controlado mediante Arduino

Trabajo final de grado

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Pascual Griñán, Ferran

Tutor: González Sorribes, Antonio

Segundo tutor: Salt Llobregat, Julián José

Curso académico: 2020/2021

Agradecimientos

Finaliza esta etapa que ha durado 4 años y solo me queda mirar atrás y recordar el camino. Agradecer a todas las personas que me han acompañado durante este periodo, a las que ya estaban y a las nuevas. A mis padres por el apoyo incondicional. A mis amigos de toda la vida. A mis amigos de Rol. A mis compañeros de clase. A mi tutor Antonio por el trabajo dedicado.

Resumen

El objetivo del proyecto es diseñar, fabricar y controlar un brazo robótico de 6 grados de libertad con el fin de emular tareas de manipulación de objetos. El brazo robótico se inspira en el diseño del Robot KUKA y el brazo robótico del Rover Curiosity de Marte usado en misiones espaciales para la recogida de muestras interplanetarias. El diseño del robot se realizará mediante el programa Fusion 360, y posteriormente se generarán mediante impresora 3D las piezas de la maqueta. Se verificará la viabilidad de la cinemática del robot mediante el programa RobotScene. El control cinemático del robot y las rutinas de la tarea a emular se implementarán mediante Arduino.

Palabras clave: Brazo robótico, Servomotor, Impresión 3D, Arduino, Control.

Abstract

The objective of the Project is to design, manufacture and control a robotic arm with 6 degrees of freedom in order to emulate object manipulation tasks. The robotic arm is inspired by the design of the KUKA Robot and the robotic arm of the Mars Rover Curiosity used in space missions to collect interplanetary samples. The design of the robot will be carried out using the Fusion 360 program, and later the parts of the model will be generated using a 3D printer. The viability of the robot kinematics will be verified using the RobotScene program. The kinematic control of the robot and the routines of the task to be emulated will be implemented by Arduino.

Key words: Robotic arm, Servomotor, 3D Printing, Arduino, Control.

Resum

L'objectiu d'el projecte és dissenyar, fabricar i controlar un braç robòtic de 6 graus de llibertat per tal d'emular tasques de manipulació d'objectes. El braç robòtic s'inspira en el disseny del Robot KUKA i el braç robòtic del Rover Curiosity de Mart gastat en missions espacials per a la recollida de mostres interplanetàries. El disseny del robot es realitzarà mitjançant el programa Fusion 360, i posteriorment es generaran mitjançant impressora 3D les peces de la maqueta. Es verificarà la viabilitat de la cinemàtica del robot mitjançant el programa RobotScene. El control cinemàtic del robot i les rutines de la tasca a emular s'implementaran mitjançant Arduino.

Paraules clau: Braç robòtic, Servomotor, Impressió 3D, Arduino, Control.

Índice

Memoria	15
1. Objetivos.....	17
1.1. Objetivo general	17
1.2. Objetivos específicos	17
1.3. Alcance del trabajo.....	17
2. Introducción	18
2.1. Historia de la robótica.....	18
2.2. Programas utilizados.....	19
2.2.1. Fusion 360.....	19
2.2.2. RobotScene.....	20
2.2.3. TinkerCad.....	21
2.2.4. MATLAB	21
2.2.5. Arduino IDE.....	22
2.3. Componentes	23
2.3.1. Servomotor SG90.....	23
2.3.2. Servomotor MG996R.....	24
2.3.3. Placa Elegoo Uno R3	24
2.3.4. Fuente de alimentación regulable.....	25
2.3.5. Placa Protoboard	26
2.4. Marco teórico.....	27
2.4.1. Estructura mecánica de un brazo robótico industrial	27
2.4.2. Elementos terminales	30
2.4.3. Espacio de trabajo	31
2.4.4. Bocetos.....	31
3. Diseño del brazo robótico.....	33
3.1. Modelado de las piezas.....	33
3.1.1. Base	33
3.1.2. Placa Rotación.....	34
3.1.3. Soporte Motor	35

3.1.4. Eslabón 2 parte izquierda	35
3.1.5. Eslabón 2 parte derecha.....	36
3.1.6. Eslabón 2.....	37
3.1.7. Enganche	38
3.1.8. Varilla de transmisión	38
3.1.9. Eslabón 3.....	38
3.1.10. Interior Eslabón 3.....	39
3.1.11. Muñeca 1	39
3.1.12. Muñeca 2.....	40
3.1.13. Base Pinza	40
3.1.14. Engranaje 1.....	41
3.1.15. Engranaje 2.....	42
3.1.16. Biela	42
3.1.17. Pinza.....	42
2.2. Montaje virtual.....	44
2.2.1. Base/Cintura	44
2.2.2. Hombro/Brazo.....	45
2.2.3. Codo/Antebrazo	45
2.2.4. Muñeca.....	46
2.2.5. Pinza de agarre	47
2.2.6. Ensamblaje brazo robótico	48
2.3. Comprobaciones posteriores	49
2.4. Rango articular.....	49
2.5. Fabricación	51
2.6. Montaje	51
4. Análisis cinemático	52
4.1. Introducción teórica.....	52
4.2. Cinemática directa	56
4.2.1. Verificación en RobotScene.....	59
4.3. Cinemática inversa.....	62
4.3.1. Obtención de la posición	62
4.3.2. Obtención de la orientación.....	65

5. Control del brazo robótico.....	68
5.1. Montaje del circuito electrónico.....	68
5.2. Código de control	69
6. Conclusiones.....	73
Bibliografía.....	74
Apéndice A - Cálculos cinemáticos	77
Apéndice B – Código Arduino.....	79
B.1. Programa de verificación.....	79
B.2. Programa movimiento eslabones	81
Planos.....	85
C.1. Plano Ensamblaje principal	87
C.2. Plano Base	88
C.3. Plano Placa rotación.....	89
C.4. Plano Soporte motor	90
C.5. Plano Eslabón 2 parte izquierda	91
C.6. Plano Eslabón 2 parte derecha.....	92
C.7. Plano Enganche	93
C.8. Plano Varilla de transmisión.....	94
C.9. Plano Eslabón 3	95
C.10. Plano Interior eslabón 3.....	96
C.11. Plano Muñeca 1	97
C.12. Plano Muñeca 2 parte 1	98
C.13. Plano Muñeca 2 parte 2	99
C.14. Plano Base pinza.....	100
C.15. Plano Engranaje 1	101
C.16. Plano Engranaje 2	102
C.17. Plano Biela	103
C.18. Plano Pinza.....	104
Pliego de condiciones	106
D.1. Condiciones de los materiales.....	108
D.2. Condiciones de la ejecución	115
D.3. Pruebas de servicio.....	117

Presupuesto	120
E.1. Coste de recursos humanos.....	122
E.2. Coste de materiales.....	122
E.3. Coste de Software	123
E.4. Coste de Hardware	123
E.5. Coste de fabricación en taller	124
E.6. Coste total.....	124

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Entorno de trabajo de Fusion 360.....	19
Ilustración 2. Interfaz constructor de robots RobotScene.....	20
Ilustración 3. Interfaz diseño de circuitos TinkerCad.....	21
Ilustración 4. Interfaz MATLAB.....	21
Ilustración 5. Interfaz Arduino IDE.....	22
Ilustración 6. Servomotor SG90.....	23
Ilustración 7. Servomotor MG996R.....	24
Ilustración 8. Placa Elegoo Uno R3.....	25
Ilustración 9. Fuente de alimentación regulable.....	25
Ilustración 10. Placa Protoboard.....	26
Ilustración 11. Patrón de láminas conductoras.....	26
Ilustración 12. Robot KUKA.....	29
Ilustración 13. Rover Curiosity Marte.....	29
Ilustración 14. Esquema brazo robótico.....	30
Ilustración 15. Espacio de trabajo robot KUKA.....	31
Ilustración 16. Espacio de trabajo robot Configuración esférica.....	31
Ilustración 17. Primer boceto.....	32
Ilustración 18. Boceto final.....	32
Ilustración 19. Base.....	34
Ilustración 20. Placa Rotación.....	34
Ilustración 21. Soporte Motor.....	35
Ilustración 22. Eslabón 2 parte izquierda.....	36
Ilustración 23. Eslabón 2 parte derecha.....	37
Ilustración 24. Eslabón 2.....	37
Ilustración 25. Enganche.....	38
Ilustración 26. Varilla de transmisión.....	38
Ilustración 27. Eslabón 3.....	39
Ilustración 28. Interior Eslabón 3.....	39
Ilustración 29. Muñeca 1.....	40
Ilustración 30. Muñeca 2.....	40
Ilustración 31. Base Pinza.....	41
Ilustración 32. Engranaje 1.....	41
Ilustración 33. Engranaje 2.....	42
Ilustración 34. Biela.....	42
Ilustración 35. Pinza.....	43

Ilustración 36. Vista explosionada Base/Cintura.....	44
Ilustración 37. Ensamblaje Base/Cintura.....	44
Ilustración 38. Vista explosionada Hombro/Brazo.....	45
Ilustración 39. Ensamblaje Base/Brazo.....	45
Ilustración 40. Vista explosionada Codo/Antebrazo.....	45
Ilustración 41. Ensamblaje Base/Antebrazo.....	45
Ilustración 42. Vista explosionada Muñeca.....	46
Ilustración 43. Ensamblaje Base-Muñeca.....	46
Ilustración 44. Vista explosionada Pinza de agarre.....	47
Ilustración 45. Pinza de agarre.....	47
Ilustración 46. Mecanismo Pinza de agarre.....	47
Ilustración 47. Apertura Pinza de agarre.....	48
Ilustración 48. Ensamblaje Principal.....	48
Ilustración 49. Herramienta Interferencia Fusion 360.....	49
Ilustración 50. Alcance máximo brazo robótico.....	50
Ilustración 51. Alcance mínimo brazo robótico.....	50
Ilustración 52. Ensamblaje brazo robótico.....	51
Ilustración 53. Matrices de transformación homogénea en un caso real.....	54
Ilustración 54. Sistemas de coordenadas de cada eslabón.....	57
Ilustración 55. Eslabón 3 en RobotScene.....	59
Ilustración 56. Parámetros D-H y movimiento articular.....	60
Ilustración 57. Movimiento articular.....	61
Ilustración 58. Matriz cambio de variable.....	62
Ilustración 59. Croquis articulación 1.....	63
Ilustración 60. Croquis articulaciones 2 y 3.....	63
Ilustración 61. Configuración Codo Arriba/Codo Abajo.....	64
Ilustración 62. Montaje circuito.....	69
Ilustración 63. Señal PWM en servomotor.....	70
Ilustración 64. Entorno simulación TinkerCAD.....	71
Ilustración 65. Accesorio circular servomotor MG996R.....	117
Ilustración 66. Accesorio aspa servomotor MG996R.....	117

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades Servomotor SG90	23
Tabla 2. Propiedades Servomotor MG996R	24
Tabla 3. Tipos articulaciones.....	27
Tabla 4. Estructuras articuladas.....	28
Tabla 5. Rango articular eslabones.....	50
Tabla 6. Parámetros Denavit-Hartenberg.....	57
Tabla 7. Correspondencia pines y servomotores.....	68
Tabla 8. Comandos más comunes en Arduino	70
Tabla 9. Especificaciones técnicas servomotores.....	118
Tabla 10. Coste recursos humanos	122
Tabla 11. Costes materiales.....	123
Tabla 12. Costes software	123
Tabla 13. Costes hardware	123
Tabla 14. Costes fabricación taller	124
Tabla 15. Coste total.....	124

Parte I
Memoria

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

El objetivo principal de este proyecto es realizar la maqueta de un brazo robótico que sea capaz de emular tareas de manipulación de objetos.

1.2. Objetivos específicos

- Diseño de las piezas que conformarán el brazo robótico.
- Desarrollo del modelo cinemático directo e inverso del brazo robótico diseñado.
- Desarrollo del código en Arduino que permita el control del brazo robótico.
- Evaluar la solución obtenida y determinar posibles mejoras.

1.3. Alcance del trabajo

Una vez resueltos todos los objetivos de este proyecto la maqueta del brazo robot resultante deberá ser capaz de moverse de manera controlada y hacer función de su elemento terminal para recoger objetos. De esta manera le será posible realizar tareas de Pick and Place con objetos de tamaño pequeño y de un peso medianamente ligero.

2. Introducción

2.1. Historia de la robótica

La robótica se remonta siglos atrás, y proviene del afán del ser humano de crear seres a su semejanza que pudieran realizar tareas pesadas, tediosas o peligrosas en su lugar. En una época donde los términos robótica o robot aún no se conocían y no fue hasta más tarde que se adoptaron.

Siguiendo una definición más científica, la robótica es la rama de la ingeniería que, combinando diversas disciplinas como la mecánica o la electrónica entre otras, permite el diseño, construcción y control de los robots.

El inicio de la robótica tal y como la conocemos actualmente puede determinarse entre los siglos XVII y XVIII, empezando por la invención del ingeniero francés Jacques de Vaucansos que construyó unos muñecos humanoides capaces de tocar instrumentos (1738), siguiendo con Joseph Jacquard que inventa en 1801 la máquina textil programable llamada telar. La revolución Industrial impulsó el desarrollo de esta rama obteniendo grandes avances.

No fue hasta 1920 que se empleó el término “Robot” en la obra teatral de ciencia ficción R.U.R. (Rossum’s Universal Robots) escrita por el checo Karel Čapek. El término “Robot” proviene de la palabra checa “robota”, que significa servidumbre o trabajo forzado. Más tarde, Isaac Asimov asentará el término “Robótica” en sus numerosas novelas y definirá las famosas Tres Leyes de la Robótica.

Dejando a un lado la ciencia ficción, el mundo de la robótica siguió evolucionando y tomó gran impulso sobre todo a partir de la década de los años 50. El gran desarrollo tecnológico y los avances en computación contribuyeron a flexibilizar los mecanismos autómatas para poder controlarlos y que operasen de forma autónoma dentro de la industria.

En 1954 aparece el primer robot comercial programable apodado como Unimate, diseñado por George Devol. Más tarde, Joseph Engelberger y George Devol fundarían la empresa Unimation convirtiéndose en los primeros fabricantes de robótica del mundo.

En el año 1962 se inicia el desarrollo de sensores y retroalimentadores, dotando de capacidad adaptativa al robot. También se inician las primeras investigaciones en inteligencia artificial en el MIT y otras instituciones.

Aparecen términos como la Mecatrónica que incluye las disciplinas de la mecánica y la electrónica dotando al conjunto de control automático gracias a Software, imprescindibles para cualquier máquina inteligente.

En 1978 el robot PUMA desarrollado por la empresa Unimation empieza a emplearse en las fábricas de General Motors.

Actualmente contamos con robots más desarrollados, como el robot humanoide Asimo de la compañía Honda o el robot humanoide ginoide Shopia, siendo este último el que podríamos decir el robot más avanzado del mundo por sus grandes capacidades que rozan las humanas.

Como última novedad, el famoso empresario estadounidense Elon Musk junto a su empresa Tesla acaban de anunciar la fabricación de un nuevo robot humanoide. Dotado de inteligencia artificial y de un sistema autónomo que utilizan los coches de la marca, el Autopilot. El Tesla Bot, así denominado, servirá para realizar tareas físicas peligrosas, repetitivas o aburridas.

[1]

2.2. Programas utilizados

Para la realización de este proyecto se han empleado diversos programas informáticos que han facilitado en gran medida la resolución de los objetivos especificados anteriormente citados. A continuación, se enumeran exponiendo sus características, por qué y para que se han utilizado dentro del proyecto. Cabe destacar que se han utilizado todos los programas descritos durante el curso universitario.

2.2.1. Fusion 360

Fusion 360 es una plataforma de software de modelado 3D, CAD, CAM y PCB basada en la nube y destinada al diseño y la fabricación de productos. [2]

Este programa permite de manera intuitiva diseñar cualquier tipo de producto deseado para garantizar su estética, forma, ajuste y función. Por otra parte, también es posible realizar diversos tipos de análisis, tensión estática, frecuencias modales o análisis térmico entre otros, para evaluar las características mecánicas de la pieza diseñada. Cuenta con otras funciones (Diseño generativo, Renderizado y Fabricación) que no han sido necesarias en este proyecto.

En la ilustración 1 se puede observar el entorno de trabajo del programa. Dispuesta en la parte superior, el programa facilita una barra de herramientas desde donde es posible realizar todas las operaciones que afectarán a la pieza la cual aparece en mitad pantalla. Dispone de una función para rotar la vista y una línea temporal que permite deshacer operaciones y que recoge las mismas en orden cronológico.

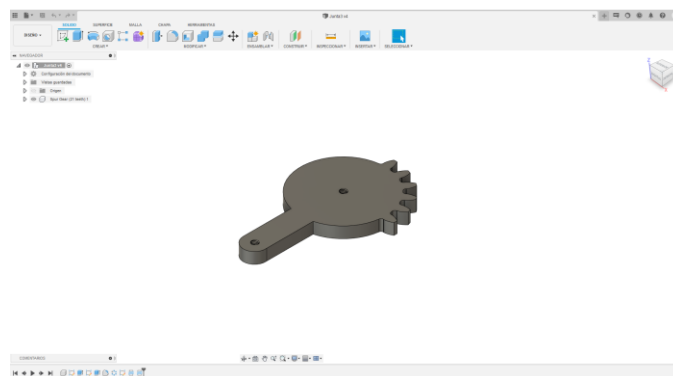


Ilustración 1. Entorno de trabajo de Fusion 360

Otra de las funciones utilizadas ha sido la de Animación, esta permite crear una animación sobre el ensamblaje diseñado. Normalmente se usa para crear vistas explosionadas de los ensamblajes creados y así ha sido en este proyecto.

Por último, se ha usado la opción de Dibujo, la cual permite crear un plano totalmente normalizado a partir de una pieza o de un ensamblaje dado.

Se ha elegido utilizar este programa de diseño por diversas razones. La facilidad para comprender su entorno y diseñar. La opción dentro del propio programa de crear los planos de las piezas diseñadas. La capacidad de trabajar mejor y con menos esfuerzo para el equipo gracias a su guardado en la nube. La ventaja de importar los diseños con el mayor conjunto de conversores de datos CAD para pasar a la fabricación rápidamente. Además, durante el curso se ha aprendido a utilizar el programa en una de las asignaturas de manera que ha sido una gran ventaja a la hora de empezar este proyecto.

2.2.2. RobotScene

Se trata de una herramienta de desarrollo y explotación de escenarios robóticos. Permite al usuario diseñar su propio robot en un espacio tridimensional y posteriormente programarlo para simular un entorno industrial virtual. [3]

Dentro del programa existen tres módulos: constructor de objetos, constructor de robots y constructor-explotador de escenarios. Para el proyecto se han empleado las dos primeras funciones. El constructor de objetos para crear lo más simplificada posible las piezas del robot y el constructor de robots para unir esas piezas y crear el brazo robótico. Más adelante, se detalla el uso de este programa para verificar la cinemática del brazo robótico.

Se ha decidido utilizar este programa porque se trata de un software gratuito que permite simular el comportamiento del robot de manera virtual.

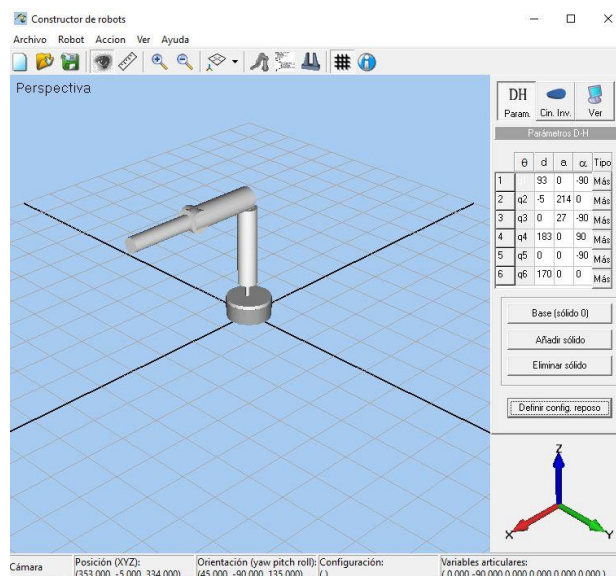


Ilustración 2. Interfaz constructor de robots RobotScene

2.2.3. TinkerCad

TinkerCad es un software online de modelado 3D que incluye herramientas de CAD. Permite la creación de diseños en 3D, circuitos y bloques de código de forma sencilla e intuitiva.[4] Se ha utilizado el creador de circuitos para diseñar el circuito electrónico conformado por los diferentes componentes del brazo robótico y el creador de bloques de código para simular en primera instancia los programas creados. Más adelante se profundiza en el circuito creado y en el código.

Dado que durante la carrera se ha utilizado este programa y las prestaciones que ofrece son suficientes se ha decidido diseñar la parte electrónica en el mismo.

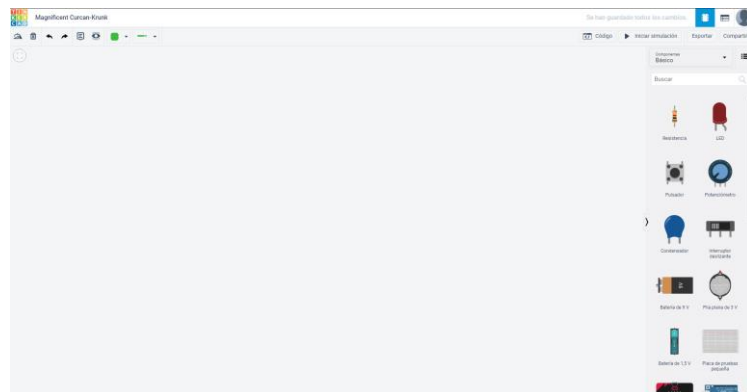


Ilustración 3. Interfaz diseño de circuitos TinkerCad

2.2.4. MATLAB

MATLAB es un software de entorno de cálculo técnico de altas prestaciones que integra análisis numérico, cálculo matricial, procesamiento de señales y gráficos en un ambiente fácil de usar. [5]

Disponemos de un editor donde introducimos los datos y las operaciones que se desea realizar, cuando todo esté listo, el programa calcula rápidamente las operaciones indicadas dando el resultado. El programa se ha utilizado para realizar operaciones matriciales simples. Más adelante se comentan los cálculos realizados de forma detallada.

El programa ya se ha utilizado en la carrera y dispone de gran potencia computacional de manera que es el programa ideal para realizar los cálculos necesarios del proyecto.

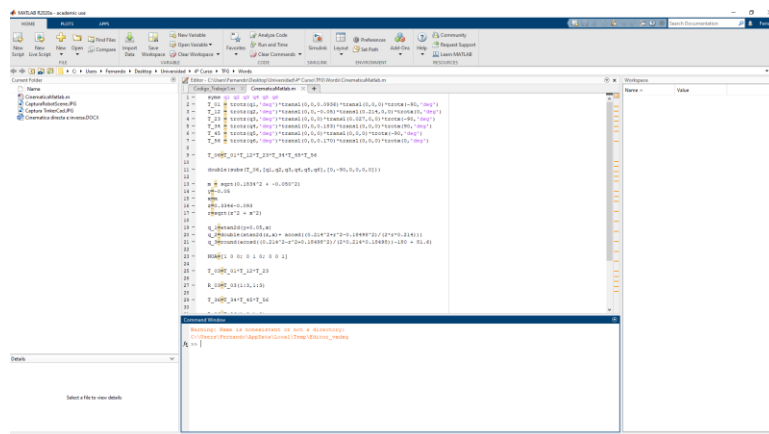


Ilustración 4. Interfaz MATLAB

2.2.5. Arduino IDE

Arduino se trata de una plataforma de creación electrónica de código abierto de hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar. [6]

En este proyecto se ha utilizado el software Arduino IDE, se trata de un entorno de programación en el que el usuario puede desarrollar y grabar el código necesario para crear cualquier aplicación deseada. El lenguaje de programación de Arduino es C++. No es un C++ puro, sino que es una adaptación que provee una biblioteca C de alta calidad para su uso con GCC en microcontroladores Atmel AVR. Una vez escrito el código, este mismo se envía a la placa Arduino Uno que hace de control. Se profundiza en el tema más adelante.

Se ha optado por este programa porque se trata de un software libre y con capacidad suficiente para realizar el código de control del brazo robótico. Además, se ha trabajado durante el curso con esta herramienta y por tanto el entorno es familiar.

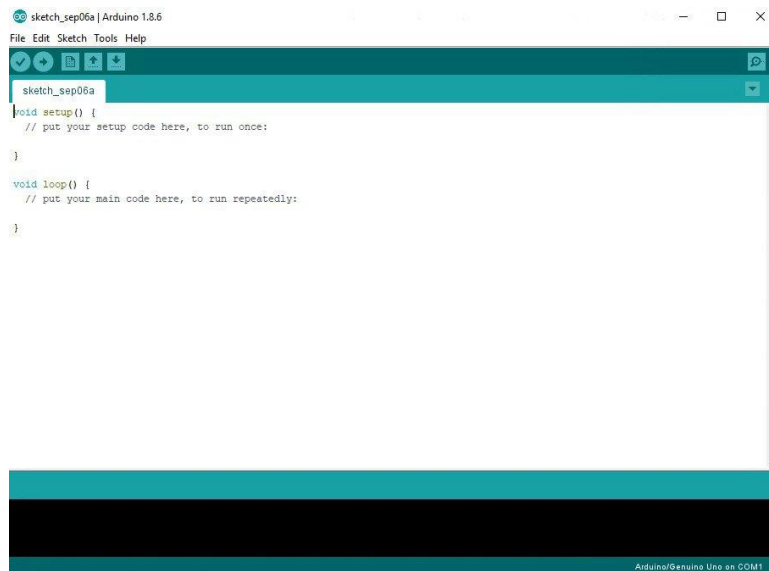


Ilustración 5. Interfaz Arduino IDE

2.3. Componentes

Para este proyecto han sido necesarios diversos dispositivos ajenos de diseño y fabricación propia. Desde un principio se sabía que el brazo robótico iba a contar con 6 grados de libertad y una pinza de agarre, por tanto, iban a ser necesarios 7 motores que proporcionasen el movimiento a las diferentes articulaciones y a la pinza. Por otra parte, uno de los objetivos del proyecto era controlar el brazo robótico así que también se ha contado con una placa Arduino. Gracias a las facilidades de la universidad se ha tenido acceso a una fuente de alimentación para suministrar la energía al brazo robótico.

En cuanto a las piezas del brazo, estas han sido diseñadas y fabricadas en impresora 3D desde cero.

A continuación, se detallan los componentes:

2.3.1. Servomotor SG90

Se trata de un micro servomotor que permite un control preciso de la posición angular. Dispone de un rango de movimiento de 180°. En cuanto a sus conexiones, se dispone de tres. El cable rojo conectado al positivo, el cable negro conectado al negativo y el cable naranja conectado a un pin de la placa Arduino Uno que permite su control. [7]

Gracias a este servomotor ha sido posible controlar 3 partes del brazo robótico, el giro de la muñeca, la segunda rotación de la muñeca y la pinza de agarre.

Más adelante se detalla cómo se ha conseguido controlar estos servomotores.



Ilustración 6. Servomotor SG90

	Dimensiones (mm)	Peso (g)	Torque (kg/cm)	Alimentación (V)	Velocidad de funcionamiento (s/grados)	Unidades
SG90	22,2 (alto) x 31 (largo) x 11,8 (ancho)	9	1.8	5	0,1/60	3

Tabla 1. Propiedades Servomotor SG90

2.3.2. Servomotor MG996R

Se trata de un micro servomotor que permite un control preciso de la posición angular. Dispone de un rango de movimiento de 180°. En cuanto a sus conexiones, se dispone de tres. El cable rojo conectado al positivo, el cable negro conectado al negativo y el cable naranja conectado a un pin de la placa Arduino Uno que permite su control. [8]

Se ha dispuesto de 4 servomotores de este tipo los cuales han servido para controlar los eslabones restantes del brazo robótico.



Ilustración 7. Servomotor MG996R

Más adelante se detalla cómo se ha conseguido controlar estos servomotores.

	Dimensiones (mm)	Peso (g)	Torque (kg/cm)	Alimentación (V)	Velocidad de funcionamiento (s/grados)	Unidades
MG996R	40 (alto) x 43 (largo) x 19 (ancho)	55	11	4.8 - 7	0,17/60	5

Tabla 2. Propiedades Servomotor MG996R

2.3.3. Placa Elegoo Uno R3

Es una placa que cuenta con un circuito integrado en el que se puede grabar instrucciones. Estas instrucciones provienen del programa Arduino IDE como se ha comentado en su correspondiente apartado. La aplicación transmite la línea de código creada a la placa y ésta interactúa con los circuitos de la misma. [9]

Dispone de diversos pines de entrada/salida. La interfaz de entrada permite al microcontrolador recibir información de los periféricos conectados, sensores varios, cámaras o dispositivos bluetooth entre otros. La interfaz de salida permite enviar la información procesada por el Arduino a otros dispositivos, pantallas, actuadores o en este caso los servomotores. Por tanto, el trayecto que sigue la señal que actúa sobre los servomotores va desde el programa creado en Arduino IDE, pasando y procesándose en la Placa de Arduino y finalmente llegando a los servomotores.

En este caso la placa elegida es de la marca Elegoo pero cuenta con las mismas características que una placa Arduino Uno.

Como se observa en la ilustración 8, en la parte superior de la placa se encuentran los pines de entrada/salida y en la parte inferior los pines correspondientes a la alimentación. Mediante el cable USB podemos conectar la placa al PC. Más adelante se detallan las conexiones correspondientes y el esquema electrónico empleado en el proyecto.

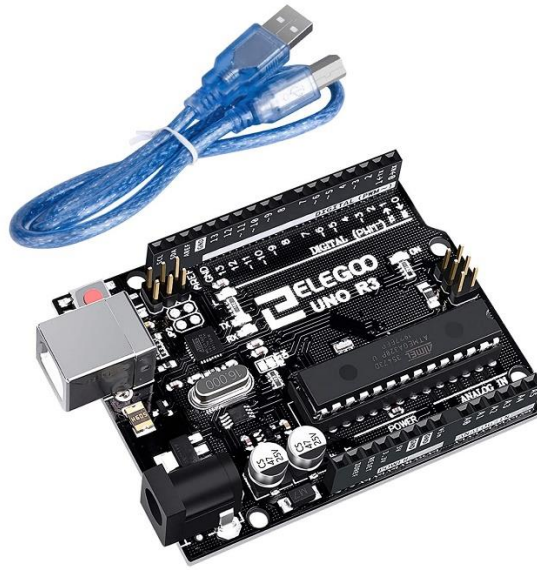


Ilustración 8. Placa Elegoo Uno R3

2.3.4. Fuente de alimentación regulable

Se trata de un dispositivo que suministra tensión y corriente constantes y regulables. Se emplea sobre todo en laboratorios electrónicos a los cuales se ha tenido acceso en la Universidad para hacer las pruebas pertinentes del proyecto. Dada su versatilidad a la hora de ajustar los parámetros requeridos ha sido la mejor opción para el suministro de energía del proyecto.



Ilustración 9. Fuente de alimentación regulable

2.3.5. Placa Protoboard

La placa protoboard o placa board es un tablero con orificios que se encuentran conectados eléctricamente entre sí de manera interna. De esta manera resulta sencillo establecer las conexiones que forman un sistema eléctrico.

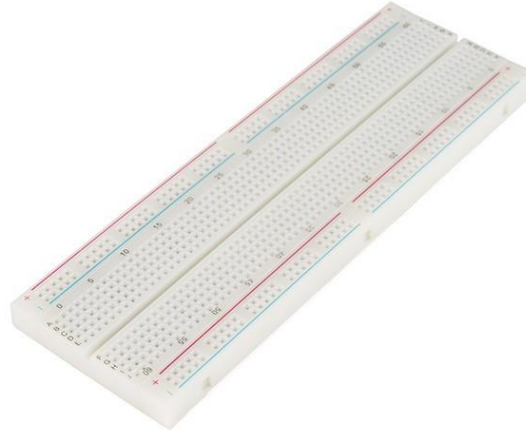


Ilustración 10. Placa Protoboard

Está hecha de dos materiales, un aislante, normalmente plástico, y un conductor que conecta los diversos orificios entre sí. El patrón utilizado en la disposición de las láminas conductoras es el siguiente:

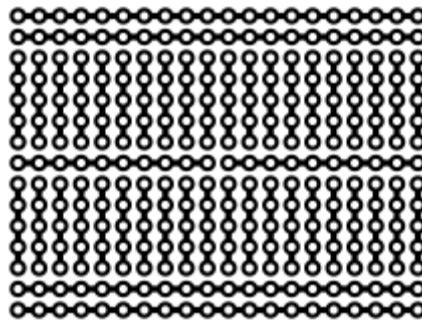


Ilustración 11. Patrón de láminas conductoras

2.4. Marco teórico

Cuando hablamos de robots, las características son muy amplias. A continuación, se definen algunos conceptos y parámetros que ha de seguir el diseño del brazo del proyecto. Un brazo robótico es un brazo mecánico programable capaz de emular tareas parecidas a las de un brazo humano. Nos centramos en los robots industriales ya que son los que mejor se ajustan a las necesidades buscadas en el proyecto. A estos se les suele llamar manipuladores y son autónomos, capaces de realizar tareas de soldadura, pintura o paletizado entre otras. [10] y [11]

2.4.1. Estructura mecánica de un brazo robótico industrial

Para dotar de movimiento al brazo robótico es necesario establecer una estructura mecánica. El brazo robótico está formado por una serie de eslabones unidos mediante articulaciones que dotan de movimiento relativo a los eslabones del robot.

Tipos de articulaciones:

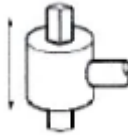
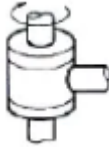
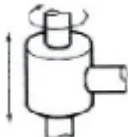


Esquema	Articulación	Grados de libertad
	Prismática	1
	Rotacional	1
	Cilíndrica	2
	Planar	2
	Esférica	3

Tabla 3. Tipos articulaciones

Tipos de configuraciones:

La combinación de los diferentes tipos de articulaciones forma diferentes estructuras mecánicas. Vienen condicionadas por la naturaleza, disposición y secuenciación de las articulaciones.

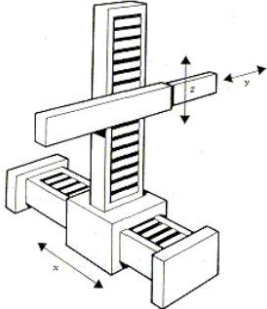
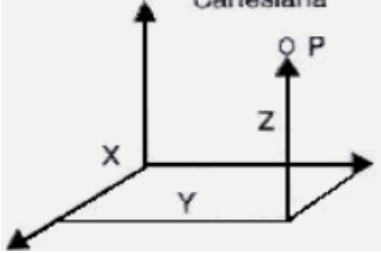
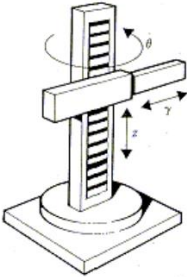
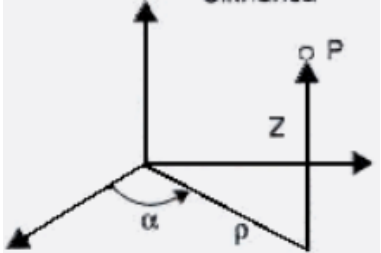
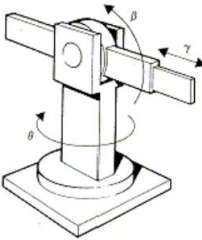
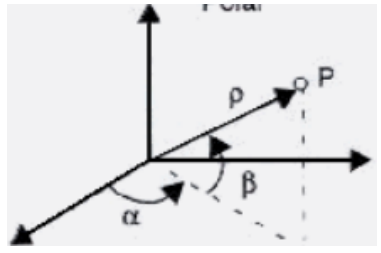
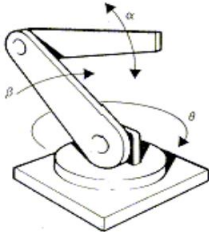
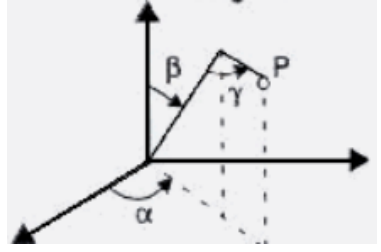
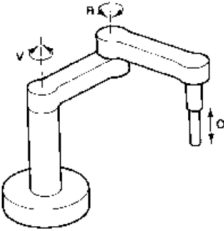
Esquema	Estructura	Representación en el espacio
	Cartesiana	
	Cilíndrica	
	Esférica o polar	
	Angular	
	Scara	Se trata de una combinación de la estructura cilíndrica y la cartesiana.

Tabla 4. Estructuras articuladas

Una vez hablado de la morfología del robot se puede introducir el concepto de **grado de libertad**. El término **grado de libertad** dentro de un brazo robótico viene definido por cada movimiento independiente que es capaz de realizar cada articulación. Como se puede apreciar, los grados de libertad de un brazo robótico vendrán definidos por el tipo de articulación usada para unir los eslabones existentes, así como del número de articulaciones y eslabones. Dentro de un espacio tridimensional se pueden conseguir como máximo 6 GDL, tres de traslación y tres de rotación. Además, 6 GDL es el mínimo necesario para alcanzar una posición deseada en el espacio con cualquier orientación.

La base de este proyecto es conseguir un brazo robótico manipulador de manera que nos interesa que sea capaz de llegar a cualquier posición dentro de su espacio de trabajo. Por esta razón se ha decidido diseñar un brazo robótico de 6 GDL.

Buscando brazos existentes se han encontrado dos que se ajustan a las características que se buscan: el robot KUKA (ilustración 12) y el brazo robótico del Rover Curiosity de Marte (ilustración 13). Ambos son brazos robóticos de 6 GDL y su función es la de manipular.



Ilustración 12. Robot KUKA



Ilustración 13. Rover Curiosity Marte

Por tanto, el brazo robótico del proyecto cuenta con 6 GDL siguiendo una estructura angular. Los tres primeros grados de libertad servirán para posicionar el robot en las coordenadas deseadas y los tres restantes servirán para orientar la herramienta de agarre. El brazo tendrá una estructura parecida al brazo de la ilustración 14. Se puede observar que el brazo sigue la anatomía de un brazo humano, cuerpo, brazo y antebrazo que proporcionan la conexión entre las articulaciones cintura, hombro, codo y muñeca. El elemento terminal se corresponde con la mano.

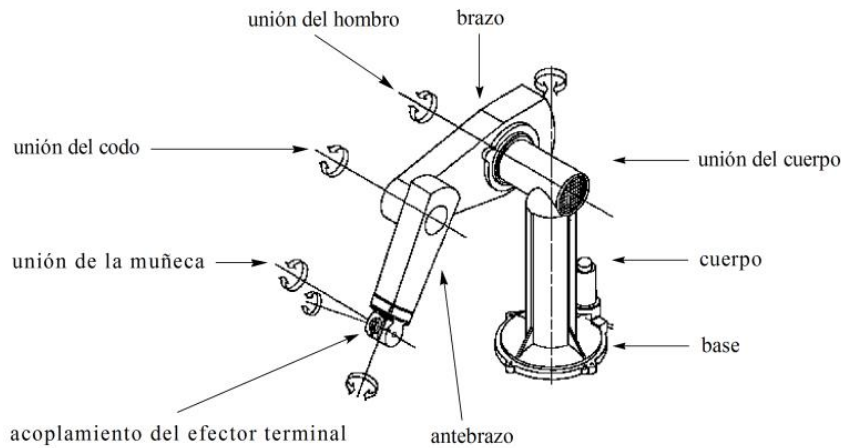


Ilustración 14. Esquema brazo robótico

Dado que se busca llevar la herramienta pinza de agarre a una posición dada las tres primeras articulaciones la posicionarán en el punto correcto y será la muñeca formada por las tres últimas articulaciones la que orientará la pinza de la manera óptima. Se ha decidido utilizar la configuración de la muñeca en Ángulos de Euler ZYZ ya que es la más habitual y permite colocar el sistema en cualquier orientación.

En términos teóricos, se dispondrá de una primera articulación de rotación, el segundo y tercer eslabón de giro y una muñeca en configuración de Ángulos de Euler ZYZ.

2.4.2. Elementos terminales

El elemento terminal es el último eslabón dentro del brazo robótico, se encarga de interactuar con los elementos que rodean al robot.

Así como los robots industriales están diseñados con una gran capacidad de adaptación y versatilidad, los elementos terminales suelen estar diseñados para una tarea específica. Es decir, un brazo robótico puede realizar la tarea de soldadura o la de paletizado, pero la herramienta utilizada para cada caso será distinta.

Atenderemos a una clasificación según si se trata de un elemento de sujeción o de un elemento que realice operaciones que no sean de agarre.

- Elementos de sujeción: se utilizan para agarrar un objeto. El ejemplo más característico es el de la pinza de agarre, pero existen también elementos de agarre por ventosas o electromagnéticos. Sus accionamientos suelen ser eléctricos y neumáticos. Suelen emplearse en tareas de paletizado o de carga y descarga de piezas.
- Herramientas: se utilizan para realizar tareas sobre el objeto. Soldadura, corte con láser, pintura o fresado son varios ejemplos más comunes. En muchas ocasiones para aumentar la productividad los robots cuentan con un aparato portaherramientas el cual les permite cambiar de herramienta automáticamente.

El elemento terminal del brazo robótico de este proyecto será una pinza de agarre accionada eléctricamente capaz de agarrar y trasladar objetos controladamente.

2.4.3. Espacio de trabajo

Sección del volumen alcanzado por el robot. En términos más generales se trata de los puntos a los que es capaz de llegar el extremo terminal del robot. Este volumen dependerá del tamaño, forma y número y tipo de articulaciones y eslabones.

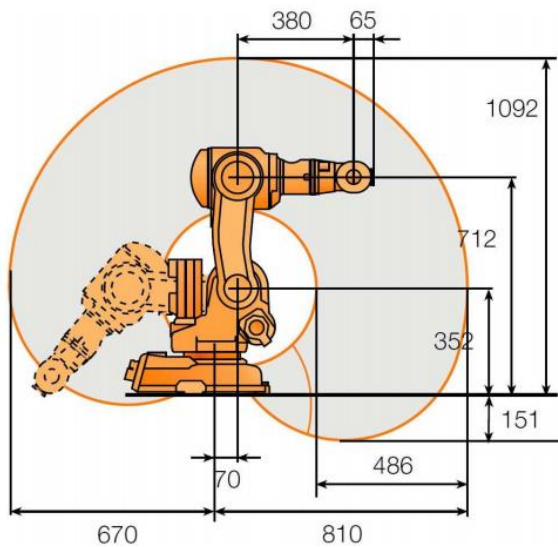


Ilustración 15. Espacio de trabajo robot KUKA

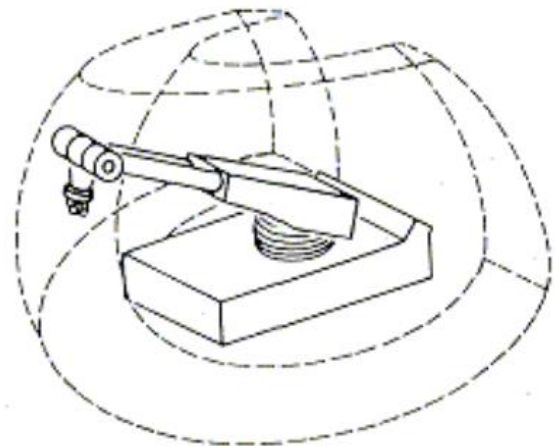


Ilustración 16. Espacio de trabajo robot Configuración esférica

2.4.4. Bocetos

El planteamiento de esta solución llevó al desarrollo de una serie de bocetos del brazo robótico.

En el primer boceto llevado a cabo se planteó una solución simple en cuanto a número y tipo de articulaciones. Cuatro eslabones simples que formarían el conjunto del brazo robótico, una base, dos eslabones de giro y la pinza de agarre. Contaría con 4 grados de libertad. No obstante, este primer diseño se llevó a cabo antes haber investigado en profundidad los puntos comentados durante todo el apartado 2.4. Por ello una vez hecha esta búsqueda de información y de referencias se procedió a realizar un segundo boceto. En este último boceto se define en carácter general la forma del brazo robótico y se deja completamente definida la estructura de los eslabones y las articulaciones. Tres primeros eslabones para posicionar el brazo robótico y tres últimas articulaciones en configuración ZYZ para orientar el elemento terminal.

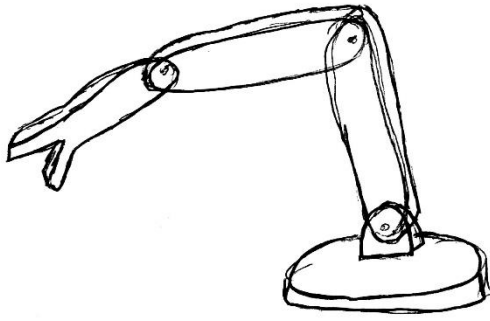


Ilustración 17. Primer boceto

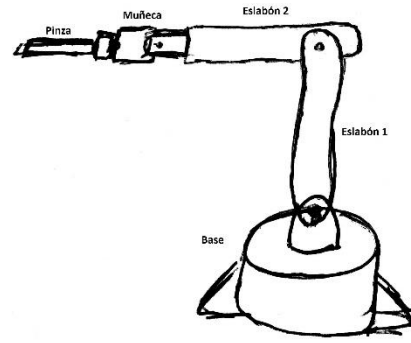


Ilustración 18. Boceto final

3. Diseño del brazo robótico

En este capítulo se procederá a exponer el proceso de diseño del brazo robótico. Se procederá a una breve introducción teórica de la morfología del robot en términos generales y posteriormente nos enfocaremos en qué solución se adapta en mejor manera al problema que se quiere abordar en este proyecto. Una vez definidas las prestaciones se procederá al diseño de las piezas en torno a esas características.

3.1. Modelado de las piezas

Una vez definida la estructura y las características que ha de tener el brazo robótico se procede a diseñar en 3D las piezas que lo formarán. Todas y cada una de las piezas que se describirán a continuación han sido diseñadas desde cero

Se tiene en cuenta el boceto final y el proceso de fabricación que seguirán las piezas para su modelado. Como las piezas serán impresas en impresora 3D se ha de tener en cuenta que esta no es capaz de reproducir con total calidad detalles demasiado pequeños o agujeros de métricas bajas entre otros.

En este apartado se explica con detalle cada pieza, su función y sus características más importantes. Se pueden consultar las cotas y las vistas normalizadas de cada pieza en el documento Planos.

Como se ha comentado anteriormente, se ha utilizado el programa Fusion 360 para el diseño de las piezas y el ensamblaje del brazo robótico.

Para diseñar el brazo robótico se han tenido en cuenta las posiciones de los servomotores. Dado que los servomotores utilizados en los primeros eslabones son las piezas más pesadas, se ha propuesto un diseño donde estén lo más centrados y cercanos a la base posible para reducir los pares estáticos y las fuerzas de inercia. Cabe destacar que todos los servomotores disponen de un par suficiente para mover sus eslabones correspondientes.

3.1.1. Base

Podemos definir esta pieza como el eslabón 0. Se trata de la estructura que servirá como soporte de todo el brazo robótico, proporcionará estabilidad ante los pares estáticos y los pares de inercia que se puedan producir en el conjunto. Cuenta con ocho puntos de anclaje en los salientes que se pueden apreciar. Diseñada con una forma circular para facilitar la rotación de la siguiente pieza

la cual será el primer grado de libertad. Además, cuenta con una cavidad interior donde se aloja el primer servomotor y un pequeño agujero en la superficie cilíndrica para el cableado.

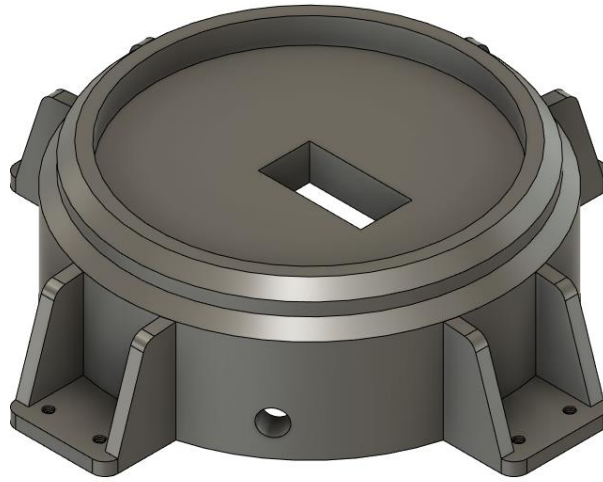


Ilustración 19. Base

3.1.2. Placa Rotación

Constituye la siguiente pieza (eslabón 1). Se trata de la pieza que proporciona el primer movimiento, una rotación alrededor del eje z. Su forma circular permite el acoplamiento a la anterior pieza. Se conecta al servomotor del eslabón 0 mediante unos agujeros en la parte inferior. Posee cuatro agujeros roscados en la superficie para anclar los soportes de los dos siguientes servomotores. El saliente que se ve en el centro servirá para anclar el segundo eslabón.

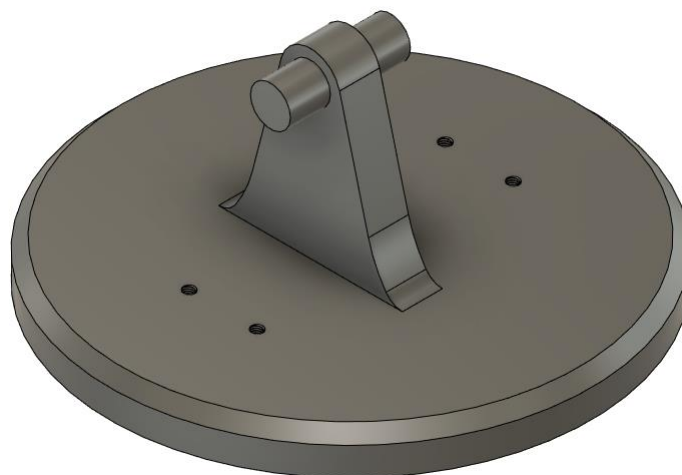


Ilustración 20. Placa Rotación

3.1.3. Soporte Motor

Como se ha comentado anteriormente, se trata de un soporte para el servomotor. Se ha diseñado la pieza con un hueco que permita albergar el servomotor y cuatro agujeros que lo anclen. Tiene dos agujeros roscados en la parte inferior para anclar a la pieza Placa Rotación. Contamos con dos piezas idénticas que servirán para los servomotores que den movimiento al eslabón 2 y al eslabón 3.

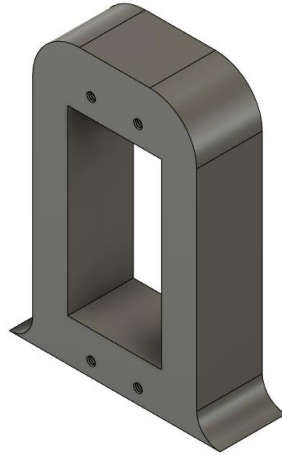


Ilustración 21. Soporte Motor

3.1.4. Eslabón 2 parte izquierda

Siguiente pieza que proporciona movimiento al brazo robótico. Junto con el eslabón 2 parte derecha forman el eslabón 2. Se ha decidido dividir la pieza en dos partes casi simétricas para facilitar el montaje del brazo robótico. Cuenta con una hendidura en la parte inferior para conectar el servomotor y dotar de movimiento al eslabón. Por tanto, ofrece el segundo grado de libertad. Cuenta con dos agujeros en la parte intermedia para unir la parte derecha del eslabón. En la parte superior se conectará el eslabón 3.



Ilustración 22. Eslabón 2 parte izquierda

3.1.5. Eslabón 2 parte derecha

Pieza que unida a la anterior forma el eslabón 2. Tiene un pequeño saliente cilíndrico en la parte inferior que permite acoplar una pieza que será la encargada junto con otra de transmitir el movimiento del tercer servomotor al eslabón 3.



Ilustración 23. Eslabón 2 parte derecha

3.1.6. Eslabón 2

Unión entre Eslabón 2 parte derecha y Eslabón 2 parte izquierda. Diseñada para seguir la forma cilíndrica que dispone todo el brazo robótico. En la parte superior se acoplará el eslabón 3.

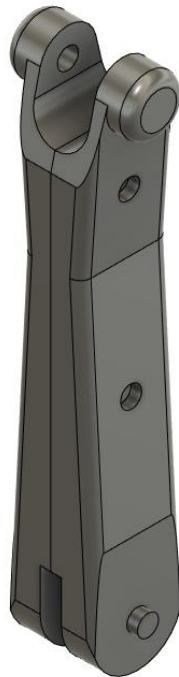


Ilustración 24. Eslabón 2

3.1.7. Enganche

Pieza que se conecta al eslabón 2 mediante una hendidura cilíndrica en la parte inferior. También se conecta al servomotor número 3 mediante la hendidura que se muestra en la parte frontal. El agujero roscado del extremo permite conectar mediante el elemento Varilla de transmisión el servomotor 3 y el eslabón 3.

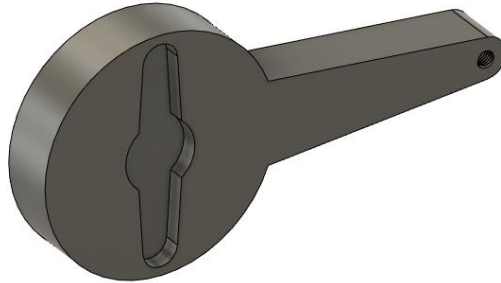


Ilustración 25. Enganche

3.1.8. Varilla de transmisión

Elemento transmisor de movimiento. Se conecta a la pieza anteriormente descrita por uno de sus extremos y al eslabón 3 por el extremo restante.



Ilustración 26. Varilla de transmisión

3.1.9. Eslabón 3

Pieza que constituye el tercer eslabón. Se ha diseñado en forma cilíndrica para reducir al máximo sus dimensiones y que se asimile a un antebrazo humano. Mediante los dos cilindros salientes de la parte inferior se conecta el eslabón 2. Cuenta con un espacio en el extremo derecho para albergar el servomotor que proporciona la primera rotación de la muñeca. El movimiento se transmitirá a través de un cilindro que pasará por el interior de la pieza. De esta manera el servomotor se encuentra en la vertical que forman el eslabón 2 y la base y se reducen los problemas ocasionados por los momentos de inercia. En el extremo inferior derecho se conecta la varilla de transmisión para proporcionar el movimiento al eslabón. Ofrece el tercer grado de libertad.



Ilustración 27. Eslabón 3

3.1.10. Interior Eslabón 3

Primera pieza de lo que se ha denominado muñeca (eslabón 4). Se trata de una pieza cilíndrica que realiza una rotación. Está dispuesta en el interior de la anterior pieza donde se conecta al servomotor 4 a través de los cuatro agujeros del extremo derecho. Con los cuatro agujeros del extremo izquierdo se conecta a la siguiente pieza de la muñeca. Este eslabón se corresponde con el cuarto grado de libertad.



Ilustración 28. Interior Eslabón 3

3.1.11. Muñeca 1

Segunda pieza de todo el elemento muñeca. Se diseña siguiendo el carácter cilíndrico de las anteriores piezas. Se conecta a la anterior pieza mediante los cuatro agujeros roscados que se ven en la imagen. Cuenta con un soporte para albergar el quinto servomotor, el cual transmite movimiento a la siguiente pieza apareciendo un nuevo grado de libertad.

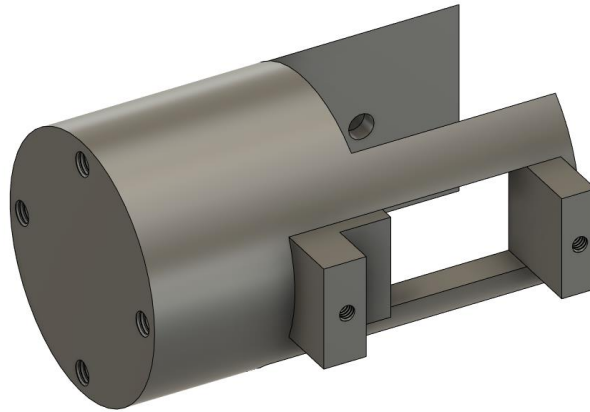


Ilustración 29. Muñeca 1

3.1.12. Muñeca 2

Última pieza del elemento muñeca. El hueco interior de la pieza permite encajar un servomotor que transmite movimiento a la siguiente articulación. Se conecta a la anterior pieza mediante un tornillo pasante en uno de sus laterales. Para facilitar el acople del servomotor se ha dividido la pieza en la parte inferior.

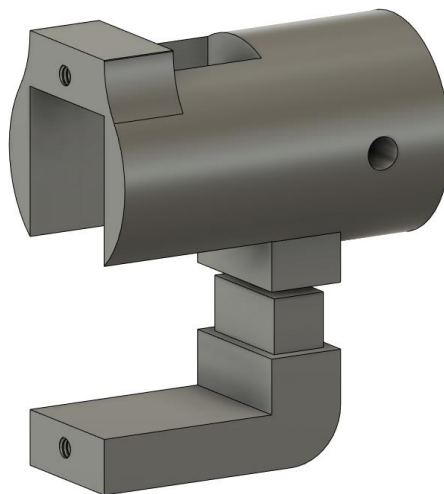


Ilustración 30. Muñeca 2

3.1.13. Base Pinza

Elemento de soporte de toda la estructura que conforma la herramienta de agarre. En cuanto a su diseño se ha intentado aligerar el peso de la pieza todo lo posible realizando una serie de agujeros que no afectan a las capacidades mecánicas de la pieza. Permite el acople del servomotor que controlara la apertura y cierre de la pinza de agarre. Se conecta a la anterior pieza mediante el saliente cilíndrico del extremo derecho. También tiene en su superficie tres agujeros roscados en los cuales se conectarán los demás elementos de la pinza.

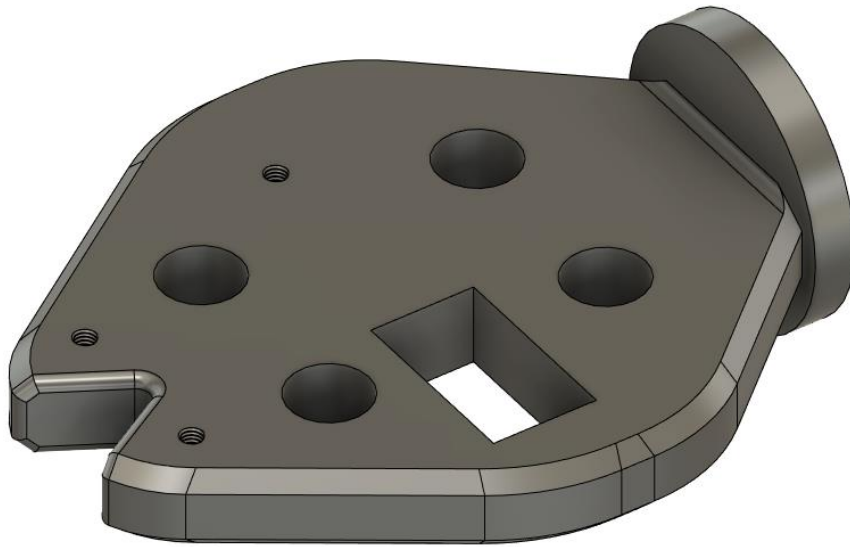


Ilustración 31. Base Pinza

3.1.14. Engranaje 1

Se trata de una pieza que cuenta con unas ruedas dentadas. Es la pieza que se conecta al motor que podemos encontrar en la Base Pinza, por tanto, es la encargada de transmitir todo el movimiento al mecanismo de la pinza de agarre.

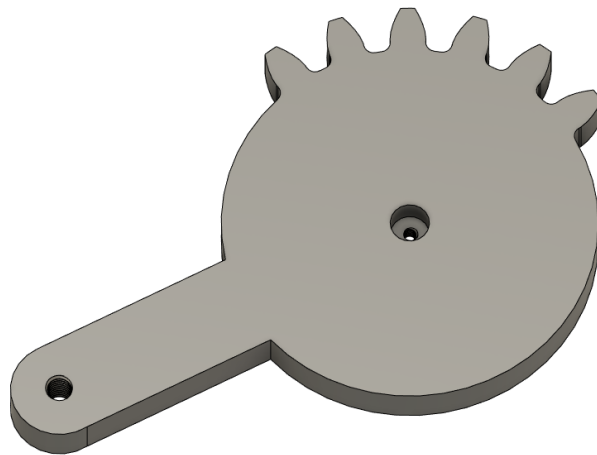


Ilustración 32. Engranaje 1

3.1.15. Engranaje 2

Engranaje conducido dentro del mecanismo de apertura y cierre de la pinza. Se ha diseñado de tal forma que los dientes del engranaje encajen y transmitan el movimiento correctamente entre las dos piezas (Engranaje 1 y Engranaje 2).

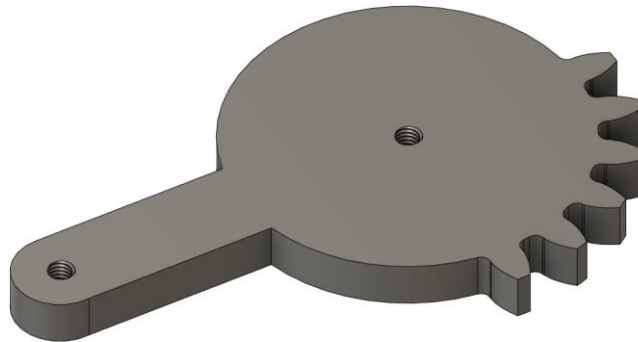


Ilustración 33. Engranaje 2

3.1.16. Biela

Otra de las piezas que forman el mecanismo de la herramienta pinza.

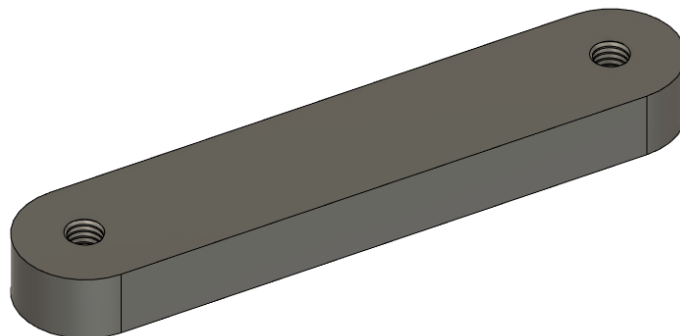


Ilustración 34. Biela

3.1.17. Pinza

Elemento que se encargará de recoger los objetos pertinentes. Se ha decidido que la parte donde se haga contacto con el objeto sea recta y plana.

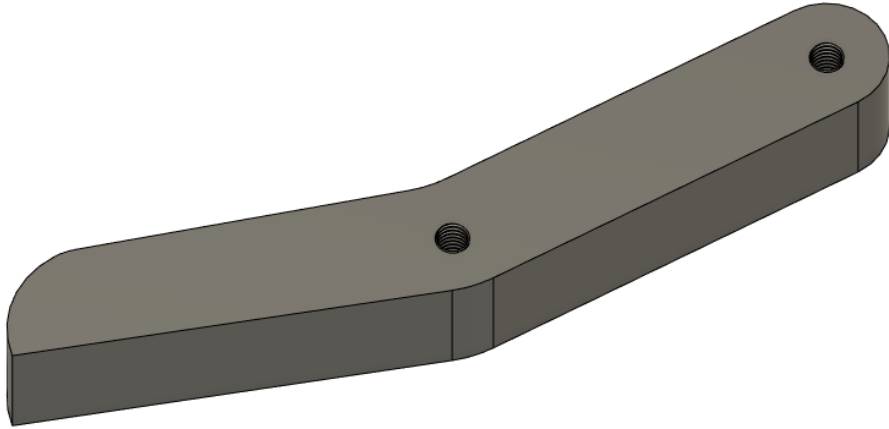


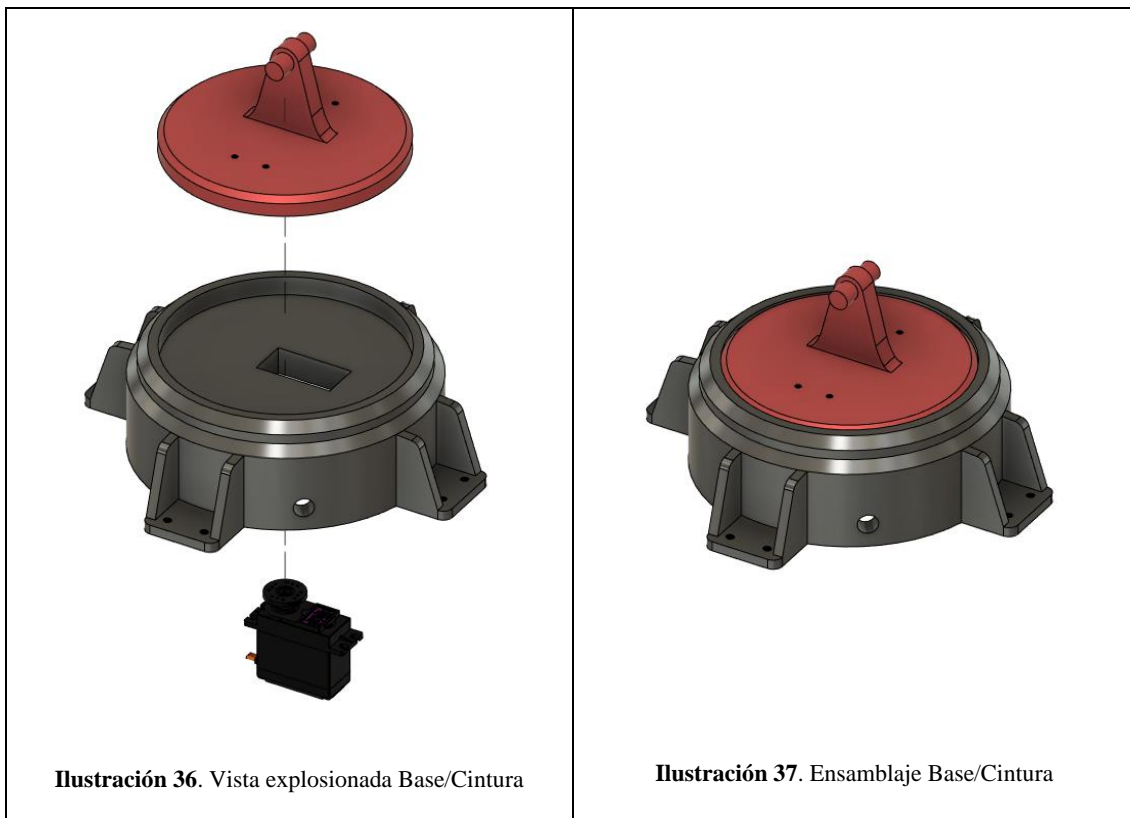
Ilustración 35. Pinza

2.2. Montaje virtual

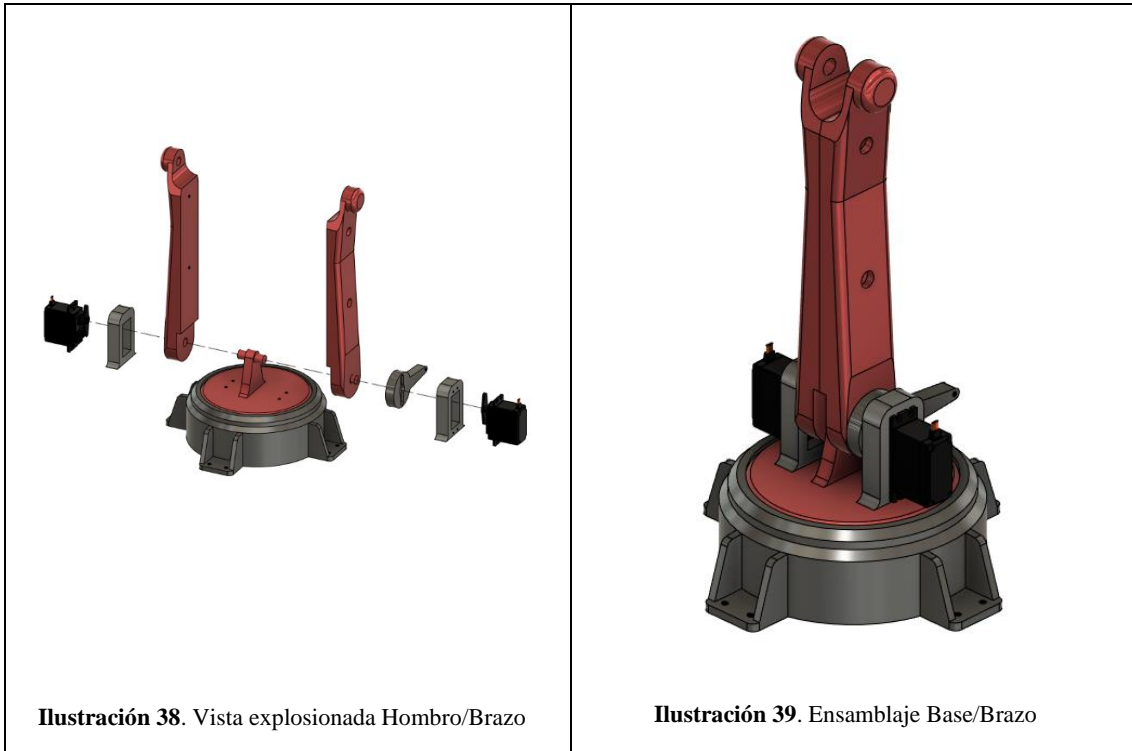
Una vez finalizado el diseño de las piezas se procede a ensamblar el brazo robótico en el programa Fusion 360. Esta acción permite verificar que las piezas se van a acoplar correctamente al conjunto y que por tanto no habrá ninguna interferencia entre los componentes. El programa también permite introducir uniones que definirán el movimiento relativo de las piezas seleccionadas. Se comprobará que los movimientos deseados entre articulaciones son los correctos.

En el documento **Pliego de Condiciones** se ha redactado un apartado llamado **Condiciones de la ejecución** donde se especifican las instrucciones para el correcto montaje del brazo robótico. En el siguiente apartado se muestran las uniones en vista explosionada de las piezas de manera que sirvan de apoyo del apartado **Condiciones de la ejecución**. Se ha utilizado la función Animación dentro del propio programa para crear estas vistas explosionadas.

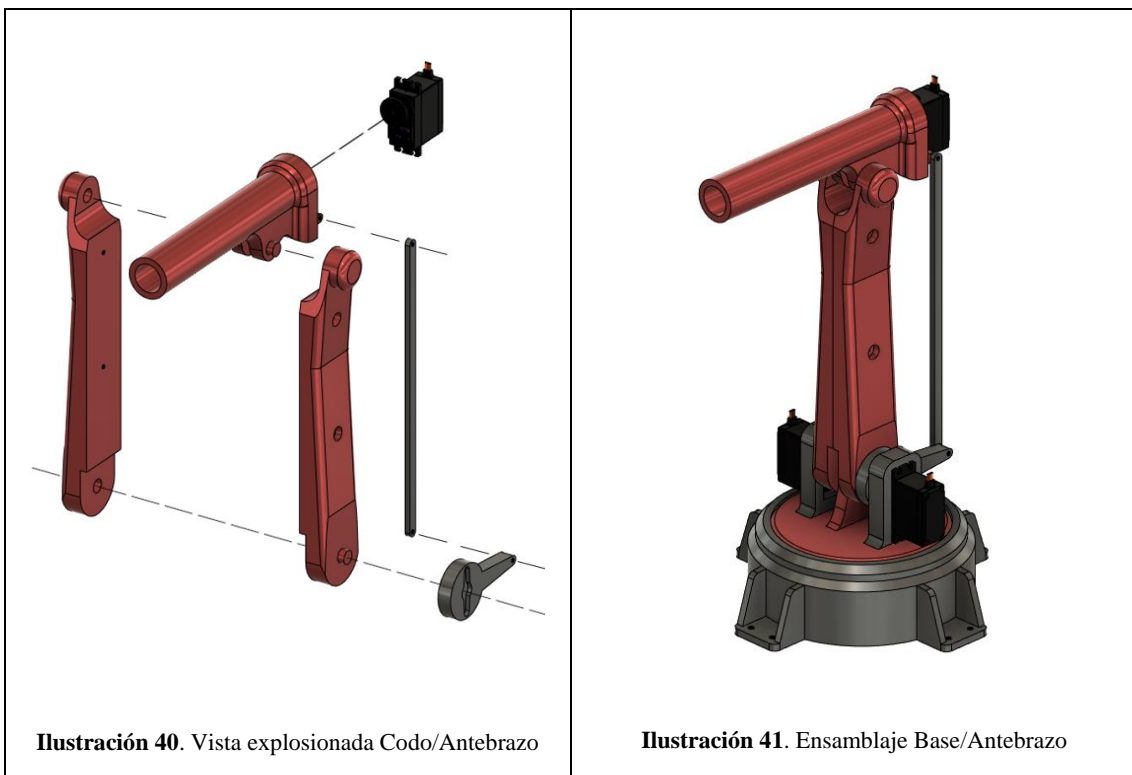
2.2.1. Base/Cintura



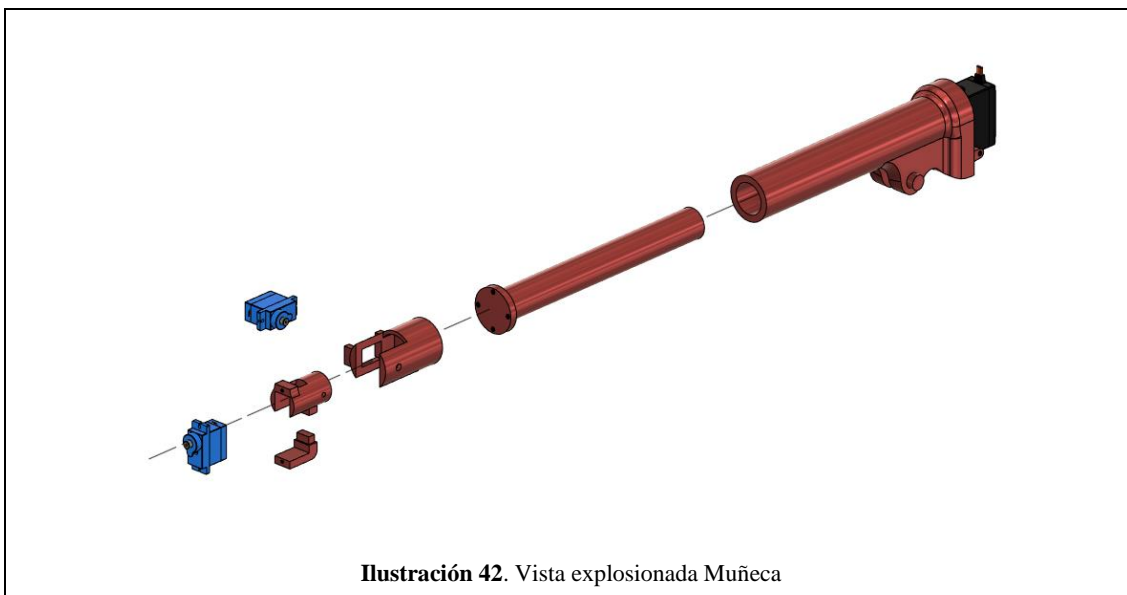
2.2.2. Hombro/Brazo



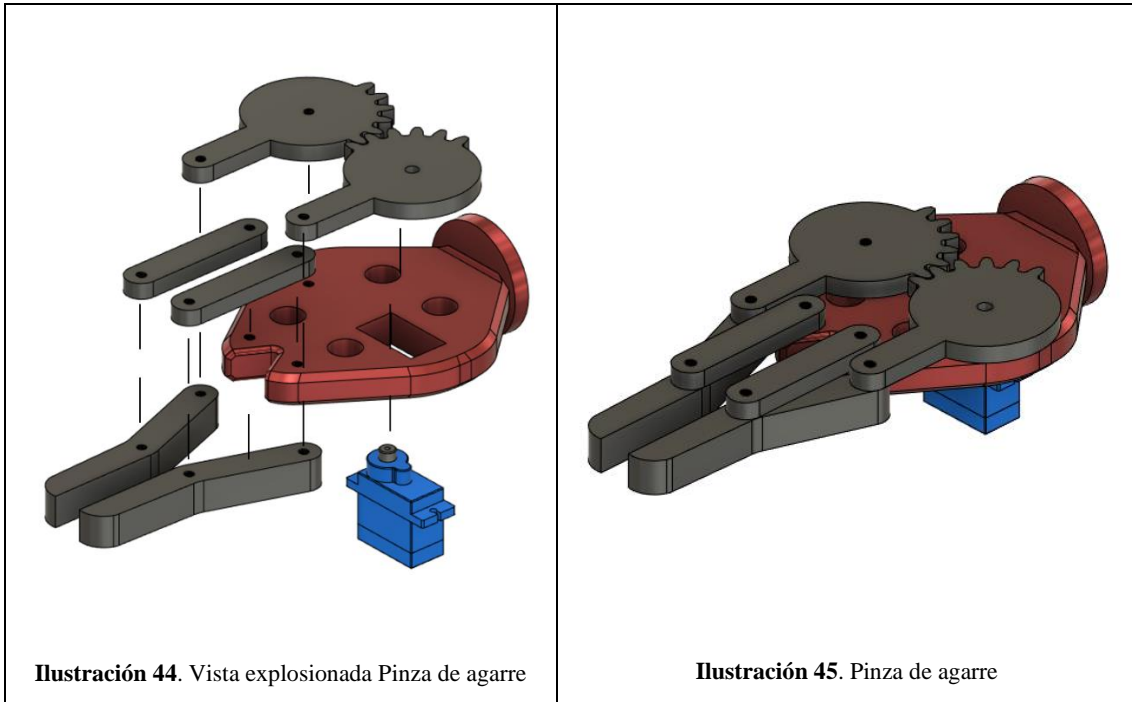
2.2.3. Codo/Antebrazo



2.2.4. Muñeca



2.2.5. Pinza de agarre



El funcionamiento de la pinza de agarre es simple. Se trata de un mecanismo de paralelogramo articulado donde la parte de la pinza ejerce una presión paralela. Las posiciones de los elementos son simétricas respecto del plano XZ. El engranaje conectado al servomotor es el encargado de transmitir el movimiento a las demás piezas. Tal y como se aprecia en la ilustración 46, los puntos A y B se encuentran fijos en la base de la pinza ejecutando un movimiento únicamente circular. Los puntos C y D sirven de conexión con la pinza, rotan y se desplazan. Por último, el segmento e corresponde a la pinza y desde un punto de vista superior permanece siempre en posición vertical gracias a este mecanismo.

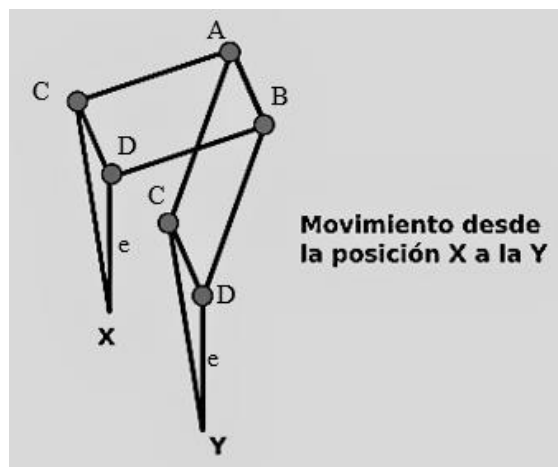


Ilustración 46. Mecanismo Pinza de agarre

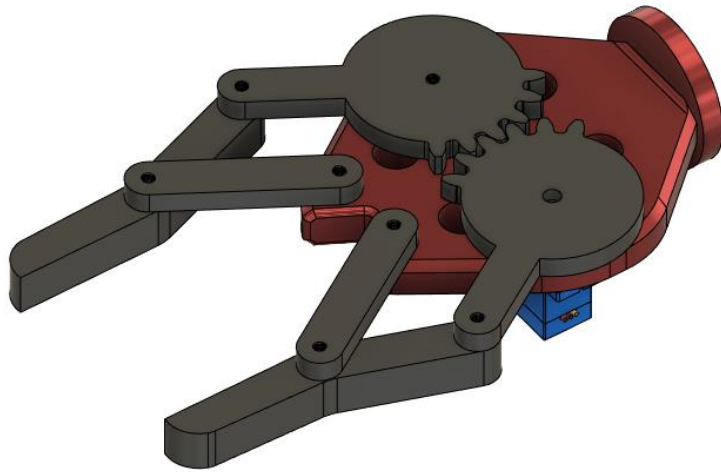


Ilustración 47. Apertura Pinza de agarre

2.2.6. Ensamblaje brazo robótico

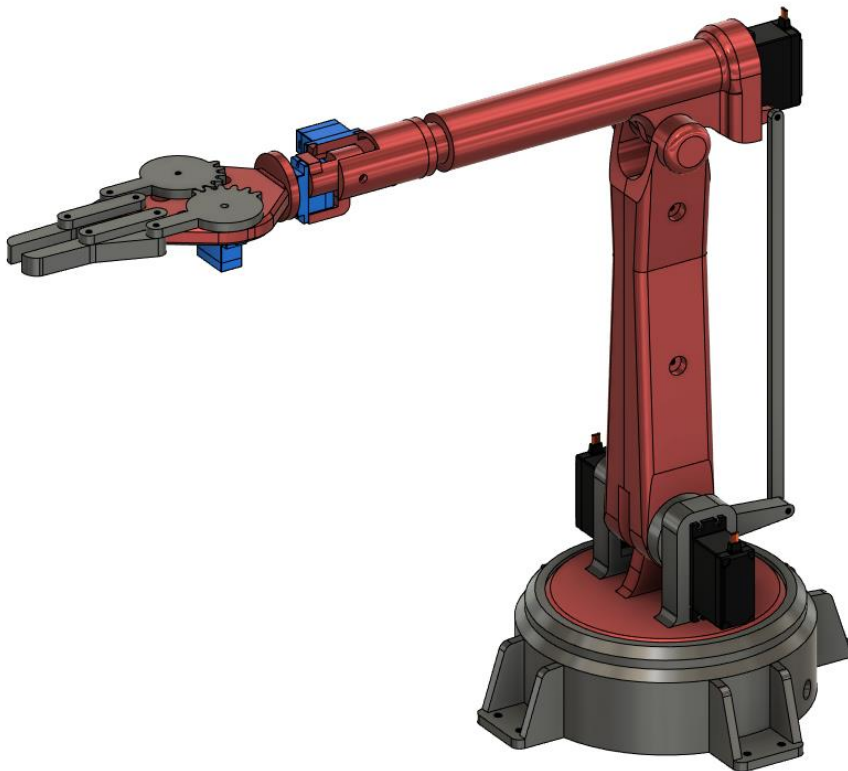


Ilustración 48. Ensamblaje Principal

2.3. Comprobaciones posteriores

Una vez finalizado el ensamblaje principal comprobamos que no existe ninguna interferencia entre sus piezas. Existe una herramienta dentro del programa que nos permite realizar esta comprobación fácilmente. Accedemos a la herramienta y seleccionamos todo el ensamblaje, el programa detectará si existen cuerpos en superposición y en caso afirmativo indicará cuales para poder modificarlos posteriormente.

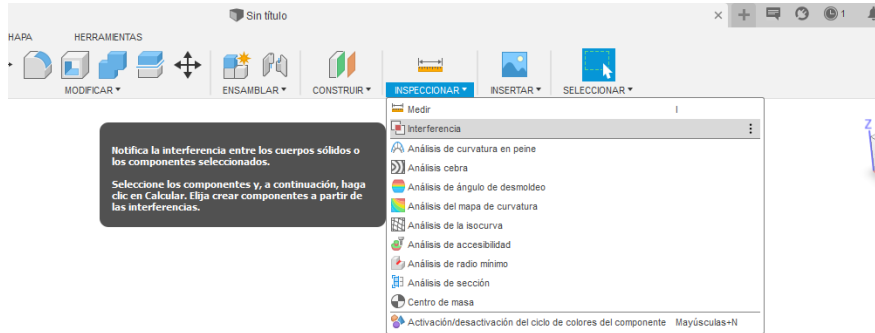


Ilustración 49. Herramienta Interferencia Fusion 360

Para poder realizar el ensamblaje ha sido necesario unir las diferentes piezas mediante *Joints* o *Uniones*. El programa permite varios tipos de *Joints*, para este proyecto se ha utilizado la unión rígida y la unión de revolución. De esta manera también se puede comprobar que el movimiento deseado en el brazo robótico es posible.

2.4. Rango articular

Una vez ensamblado el brazo robótico es posible averiguar cuál es el rango articular de cada uno de los eslabones.

El programa Fusion 360 permite mover los eslabones del brazo robótico a partir de las uniones que se han creado para ensamblar el conjunto. Se ha estudiado el rango de movimiento máximo que es capaz de alcanzar cada eslabón. Se ha de tener en cuenta que el rango de los servomotores utilizados es de 180°, por tanto, el máximo movimiento angular permitido será de 0° hasta 180°.

Eslabón	Rango en grados
Eslabón 1	0° - 180°
Eslabón 2	70° - 130°
Eslabón 3	70° - 150°
Eslabón 4	0° - 180°
Eslabón 5	0° - 180°

Eslabón 6	0° - 180°
Pinza de agarre	90° - 180°

Tabla 5. Rango articular eslabones

El alcance máximo del brazo robótico dentro de su espacio de trabajo es de 49.84 cm en el eje X. Para lograr esta posición es necesario desplazar el eslabón 2 a su posición máxima de 130°.

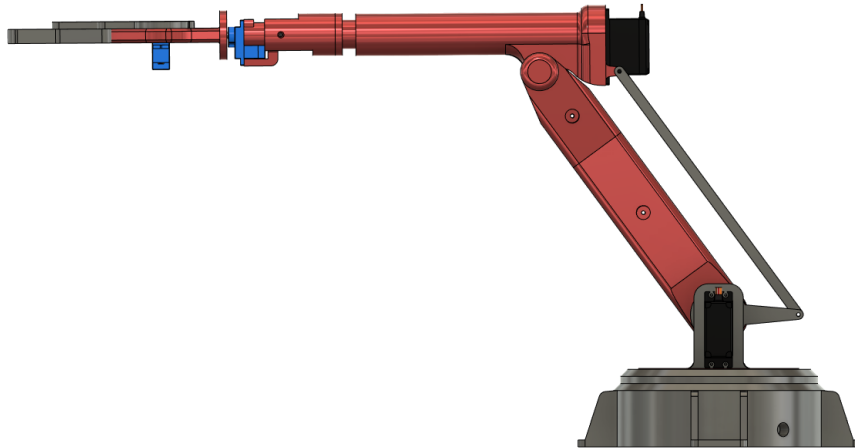


Ilustración 50. Alcance máximo brazo robótico

El alcance mínimo del brazo robótico dentro de su espacio de trabajo es de 11.55 cm en el eje X. Para lograr esta posición es necesario desplazar el eslabón 2 a su posición mínima de 70° y el eslabón 5 a su posición máxima de 180°.



Ilustración 51. Alcance mínimo brazo robótico

El espacio de trabajo del robot será el formado entre las posiciones de alcance máximo y mínimo combinadas con la rotación de la base formando así un toroide de 180°.

2.5. Fabricación

Para llevar a cabo la fabricación de las piezas modeladas se ha elegido el método de impresión en 3D. Se trata de un proceso de fabricación aditiva por el cual el material elegido es depositado capa a capa hasta formar el modelo geométrico buscado. La máquina de impresión dispone de una boquilla que permite la extrusión del material fundido. Entre los materiales más utilizados para la impresión 3D se encuentran los polímeros termoplásticos PLA y ABS, aunque también es posible utilizar metales como el acero inoxidable o el bronce.

El material de impresión facilitado por la universidad ha sido el plástico ABS.

Por otra parte, algunas de las piezas han sido construidas en metacrilato por facilidad del operario a la hora de fabricarlas. Al tratarse de una maqueta de brazo robótico y no estar estudiando específicamente en el proyecto la viabilidad de la impresión en 3D, esto no supone problema. Para fabricar las piezas de metacrilato se ha empleado una cortadora láser. El corte es producido mediante la energía térmica que se concentra en un punto específico de la superficie del material y se va desplazando conforme el contorno de la pieza. Posteriormente se utiliza gas a presión para extraer el material resultante.

2.6. Montaje

Una vez fabricadas todas las piezas se procede a ensamblar el conjunto que formará el brazo robótico. En este caso el montaje se ha pensado para que sea lo más sencillo posible utilizando únicamente tornillos y clavos. El montaje que se ha de seguir se detalla en el **Apéndice D**, Pliego de condiciones, Condiciones de la ejecución.

En la ilustración 52 se puede apreciar el ensamblaje del brazo robótico.



Ilustración 52. Ensamblaje brazo robótico

4. Análisis cinemático

En este capítulo se procederá a resolver la cinemática directa e inversa del brazo robótico. Este estudio permitirá controlar el brazo robótico para que pueda alcanzar las posiciones deseadas.

4.1. Introducción teórica

El análisis cinemático viene generado por la necesidad de definir la posición y orientación del extremo del robot respecto del sistema de referencia elegido. También surge la necesidad de conocer la posición de los eslabones del robot. [12]

A nivel espacial se deberán obtener 2 modelos fundamentales:

- Modelo geométrico directo: a partir de los parámetros geométricos del robot y las coordenadas articulares determinamos la posición y orientación del extremo del robot.
- Modelo geométrico inverso: a partir de la posición y orientación deseadas para el extremo del robot obtenemos la configuración de coordenadas articulares.

Para representar los dos modelos es necesario conocer la localización espacial de los puntos que se quiere estudiar. Para ello se emplean Coordenadas homogéneas.

Coordenadas cartesianas

$$\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)^T \quad (4.1a)$$

Coordenadas homogéneas

$$\hat{\mathbf{p}} = (\eta p_x, \eta p_y, \eta p_z, \eta)^T$$
$$\eta = 1. \quad (4.1b)$$

A partir de aquí se puede definir una matriz de transformación homogénea (4.2a), la cual servirá para representar las traslaciones y rotaciones entre los diferentes sistemas de referencia asociados a cada eslabón del robot.

$$T = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2a)$$

$$T = \begin{pmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2b)$$

- R es la submatriz ortonormal de rotación también conocida como matriz *noa*
- p es el vector de posición

Matrices de rotación puras (4.3) sobre cada uno de los ejes:

$$T_{(\alpha, \mathbf{x})} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3a)$$

$$T_{(\beta, \mathbf{y})} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3b)$$

$$T_{(\gamma, \mathbf{z})} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3c)$$

Matriz de traslación pura:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Para el cálculo de las matrices de transformación homogéneas se ha de tener en cuenta que las operaciones no son conmutativas.

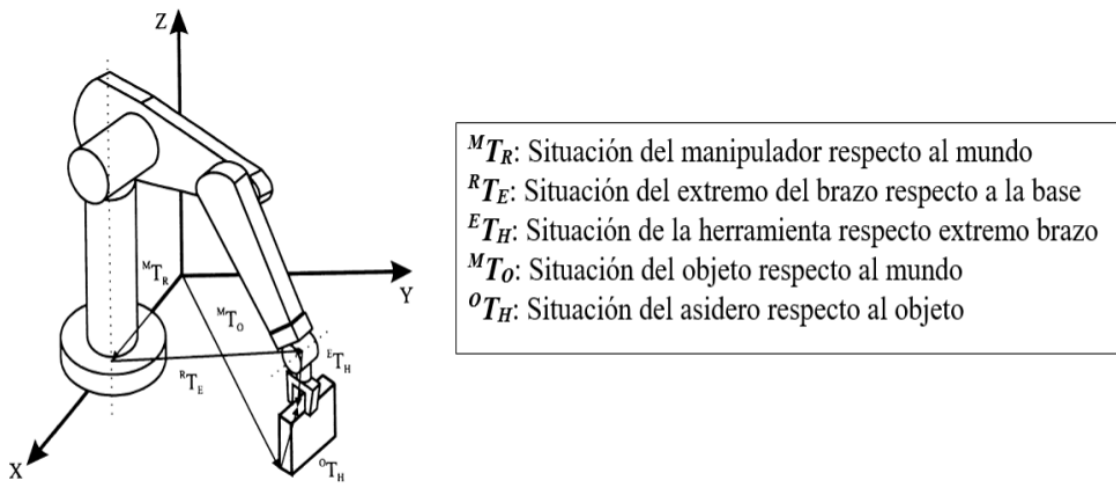


Ilustración 53. Matrices de transformación homogénea en un caso real

Como se puede apreciar en la ilustración 53, en este brazo robótico están definidas diversas posiciones relativas de sus diferentes componentes mediante matrices de transformación homogénea.

$${}^M T_R \quad (4.5a)$$

En la ecuación 4.5a, M se trata de la posición de referencia fija o coordenadas mundo y R es la posición girada y trasladada sobre ese sistema de referencia.

Es posible obtener la localización del asidero respecto de las coordenadas mundo (${}^M T_H$) sirviéndose de las diferentes matrices de transformación:

$${}^M T_H = {}^M T_R \cdot {}^R T_E \cdot {}^E T_H \quad (4.5b)$$

Además, se puede obtener la transformación inversa invirtiendo la matriz. Si queremos obtener la situación de la herramienta respecto a la base (${}^R T_H$) podemos realizar lo siguiente:

$${}^R T_H = ({}^M T_R)^{-1} \cdot {}^M T_O \cdot {}^O T_H \quad (4.5c)$$

$$({}^M T_R)^{-1} = {}^R T_M \quad (4.5d)$$

De igual manera se utilizará este método para el modelo del brazo robot del proyecto. Por tanto, el modelo cinemático directo vendrá definido por las matrices de transformación homogénea que permitirán relacionar los diferentes sistemas de referencia, pasando por todos los eslabones hasta llegar al extremo del robot.

El modelo cinemático inverso se guía a partir de las coordenadas articulares $q = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)^t$, en este caso el diseño del brazo robótico implementa 6 grados de libertad por lo que resultaran 6 parámetros de coordenadas articulares.

En contradicción con el modelo cinemático directo, el modelo cinemático inverso puede contar con un amplio número de soluciones. Estas dependen del número de articulaciones, la complejidad cinemática y las singularidades que se puedan producir.

Las configuraciones singulares son configuraciones donde se pierde 1 o más grados de libertad. Esto genera problemas numéricos dentro del modelo cinemático inverso, además de producir elevadas velocidades articulares cuando el brazo robótico se acerca al punto de la singularidad. Las velocidades elevadas suponen un problema de seguridad para el brazo robótico.

Como se ha comentado anteriormente, 6 grados de libertad es el mínimo para alcanzar una posición con cualquier orientación dentro del espacio de trabajo del brazo robótico. Se podrían obtener infinitas soluciones de coordenadas articulares para el caso de 6 GDL si contásemos con configuraciones singulares, y solo un número finito de soluciones si no existiesen configuraciones singulares. La detección de posibles singularidades vendría dada por el estudio de la matriz jacobiana, se ha omitido en este proyecto.

Contamos con diferentes métodos de resolución para el modelo inverso, numéricos y analíticos. En este proyecto se ha resuelto el modelo mediante métodos de resolución analítica, enfoque geométrico y enfoque algebraico.

4.2. Cinemática directa

Para realizar la cinemática directa del brazo robot nos serviremos del método de Denavit-Hartenberg. De esta manera es posible relacionar los diferentes sistemas de referencia unos con otros. [13]

Nos serviremos de matrices de transformación homogénea, denominamos ${}^{i-1}A_i$ a la matriz de transformación homogénea que representa la posición y orientación relativa entre los sistemas asociados a dos eslabones consecutivos del robot.

Denavit-Hartenberg permite mediante cuatro transformaciones básicas relacionar el sistema de referencia del elemento i con el sistema de referencia del elemento $i-1$.

Las transformaciones son las siguientes:

- Rotación alrededor del eje Z_{i-1} un ángulo θ_i .
- Traslación a lo largo del eje Z_{i-1} una distancia d_i .
- Traslación a lo largo del eje X_i una distancia a_i .
- Rotación alrededor del eje X_i un ángulo α_i .

La ecuación que se obtiene al unir las cuatro transformaciones es la siguiente:

$${}^{i-1}A_i = T(z, \theta_i) \cdot T(0, 0, d_i) \cdot T(a_i, 0, 0) \cdot T(x, \alpha_i) \quad (4.6a)$$

Desarrollando la ecuación 4.6a se obtiene:

$${}^{i-1}A_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \cdot \sin \theta_i & \sin \alpha_i \cdot \sin \theta_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cdot \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cdot \cos \theta_i & a_i \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.6b)$$

La representación de toda la cadena cinemática del robot vendrá dada por la sucesión de todas las matrices de transformación homogéneas parciales.

$$T = {}^0A_i = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \dots {}^{i-1}A_i \quad (4.7)$$

Una vez definida la teoría, se identifican sobre el brazo robótico los sistemas de referencia de cada eslabón.

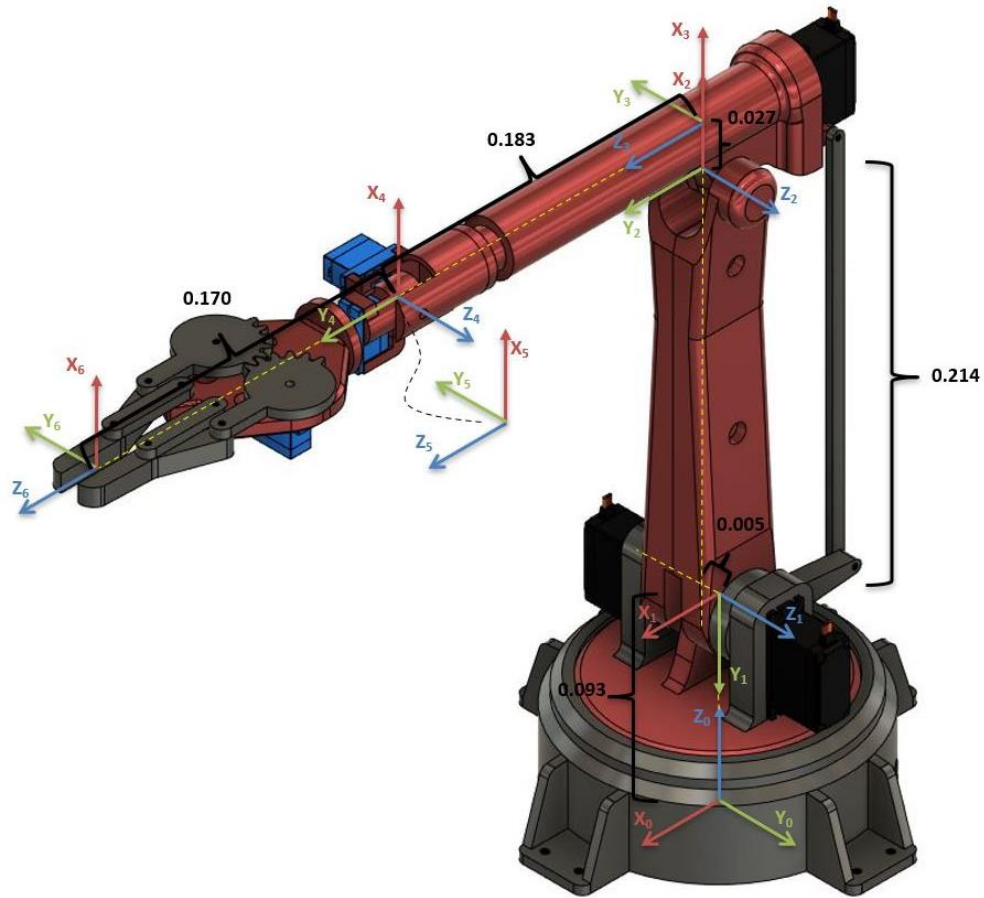


Ilustración 54. Sistemas de coordenadas de cada eslabón

Una vez obtenidos, se calculan los parámetros de Denavit-Hartenberg:

	q	d (m)	a (m)	α
0 - 1	q_1	0.093	0	-90°
1 - 2	$q_2 - 90^\circ$	-0.005	0.214	0°
2 - 3	q_3	0	0.027	-90°
3 - 4	q_4	0.183	0	90°
4 - 5	q_5	0	0	-90°
5 - 6	q_6	0.170	0	0°

Tabla 6. Parámetros Denavit-Hartenberg

La posición de reposo elegida viene definida por las siguientes coordenadas articulares:

$$q = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\} = \{0, -90, 0, 0, 0, 0\}$$

A continuación, se ha de calcular las matrices de paso, para ello se ha utilizado el programa MATLAB el cual permite obtener de forma sencilla las transformaciones básicas que relacionan los sistemas de referencia de los elementos.

Utilizamos la siguiente fórmula dentro del programa para calcular las matrices de paso:

$${}^{i-1}T_i = \text{trotz}(q_i, 'deg') \cdot \text{transl}(0,0,z_i) \cdot \text{transl}(x_i,0,0) \cdot \text{trotx}(\alpha_i, 'deg') \quad (4.8a)$$

La matriz final sería el resultado de multiplicar todas las matrices de paso correspondientes:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 \quad (4.8b)$$

Para comprobar que las operaciones se han hecho correctamente se sustituye la matriz 0T_6 para la posición de reposo $q = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\} = \{0, -90, 0, 0, 0, 0\}$:

```
ans =
      0      0.0000      1.0000      0.3530
 -0.0000  -1.0000      0.0000  -0.0500
  1.0000  -0.0000      0.0000      0.3346
      0          0          0      1.0000
```

(4.9)

Para entender el resultado nos fijamos en la matriz de transformación homogénea 4.2a. Representa una traslación y una rotación en el espacio.

Comprobamos que efectivamente el vector posición $p(p_x, p_y, p_z)$ obtenido en la ecuación 4.9 coincide con la posición en el espacio de la Pinza de agarre del Brazo robot respecto del sistema de referencia de la base.

En el **Apéndice A** se puede consultar el código empleado en MATLAB.

4.2.1. Verificación en RobotScene

Gracias a la herramienta RobotScene se ha podido verificar la cinemática directa. Este entorno de trabajo ha permitido crear un modelo virtual tridimensional del brazo robótico y ensamblarlo.

En primer lugar se ha utilizado el apartado constructor de objetos para realizar uno a uno el modelo de todas las piezas que conforman el ensamblaje. Se han simplificado lo máximo posible las piezas, buscando crear objetos geométricos básicos con las medidas generales de las diferentes piezas. Además, para la construcción de cada pieza se ha tenido en cuenta su eje de referencia asociado a la resolución de Denavit-Hartenberg. En la ilustración 54 se pueden consultar los sistemas de coordenadas de las diferentes piezas.

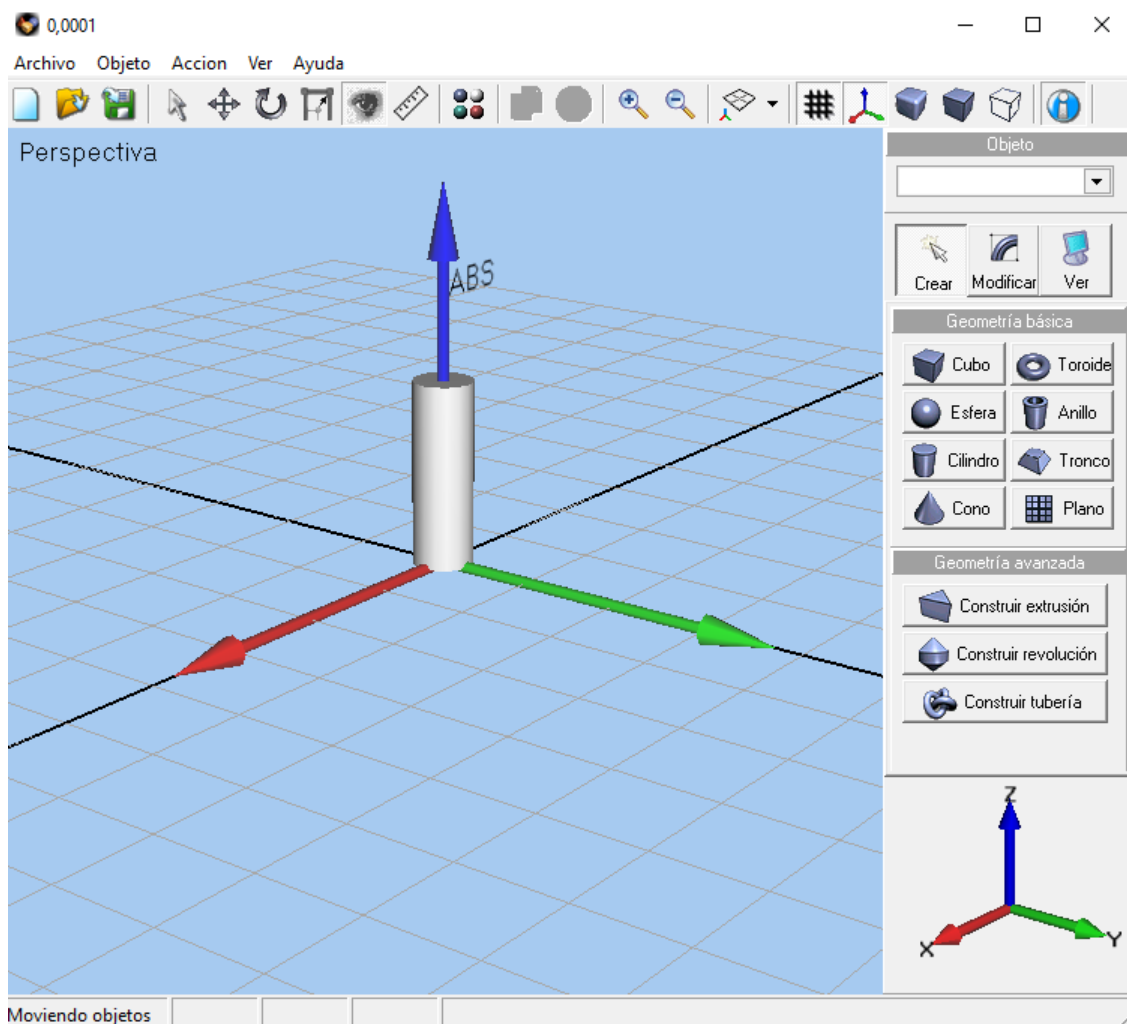


Ilustración 55. Eslabón 3 en RobotScene

Se puede apreciar en la ilustración 55 las características anteriormente comentadas para crear en este caso el eslabón 3. Se ha construido un cilindro siguiendo el eje de coordenadas (x_3, y_3, z_3) .

Una vez obtenidas todas las piezas se procede a utilizar la herramienta constructor de robots. En este módulo se procede a añadir uno a uno los sólidos creados. Se añade una base correspondiente al sólido 0 y a partir de ahí se van añadiendo los sólidos restantes siguiendo los parámetros de la

tabla de Denavit-Hartenberg, es decir, el propio programa calcula las matrices de paso de los diferentes ejes de los eslabones y los coloca en su puesto correspondiente. De manera que si la cinemática directa es correcta el ensamblaje creado en el RobotScene debe coincidir con el real. También es posible definir tanto la configuración de reposo elegida como el rango articular de los eslabones del robot.

Una vez ensamblado, se puede comprobar que el movimiento de las articulaciones es el deseado moviéndolas una a una.

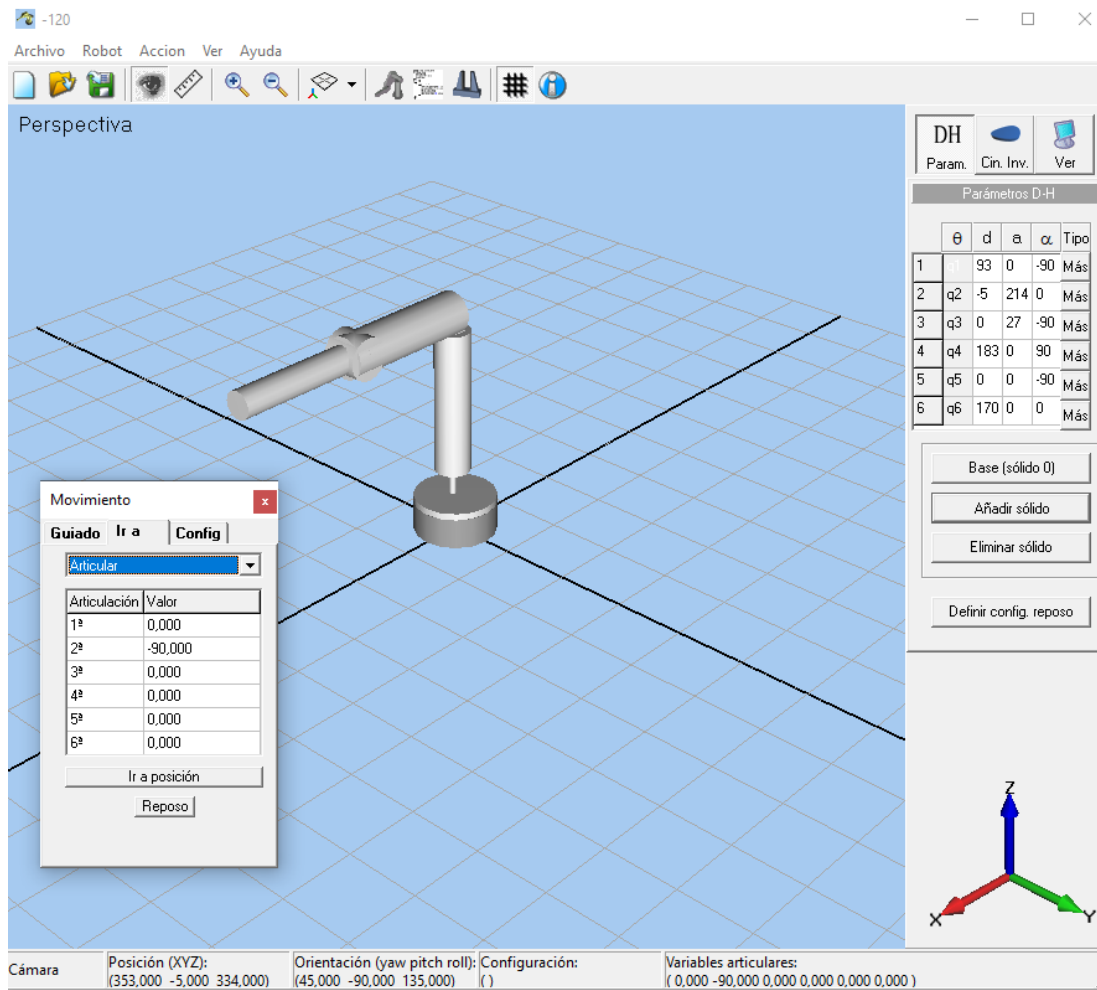


Ilustración 56. Parámetros D-H y movimiento articular

Tal y como se observa en la ilustración 56, la tabla de parámetros D-H obtenida en el programa coincide con la calculada a mano.

En la ilustración 57 se puede apreciar que cambiando los valores articulares el movimiento del brazo robótico es el esperado.

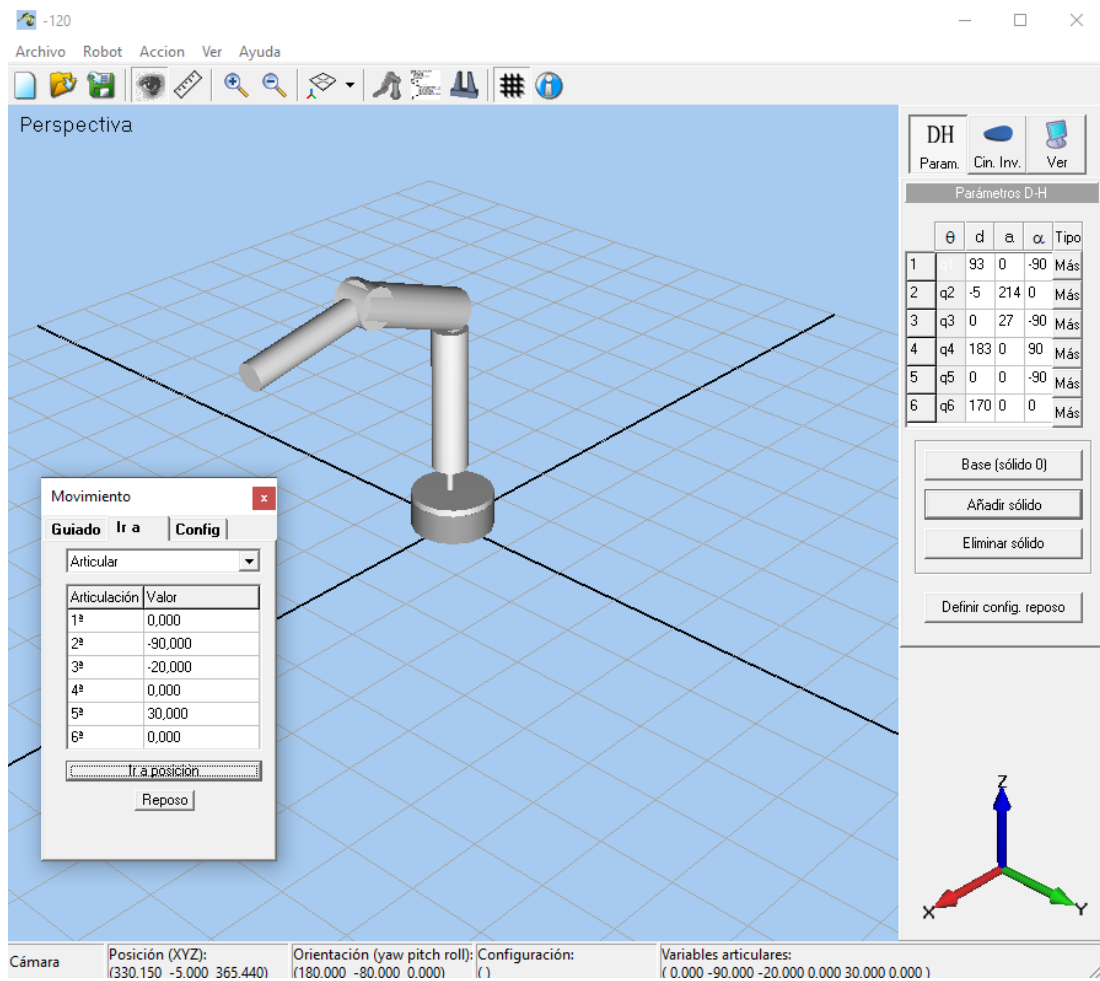


Ilustración 57. Movimiento articular

4.3. Cinemática inversa

Para obtener el modelo cinemático inverso [14] se emplea el método de desacoplo cinemático de Pieper ya que el robot planteado cumple con las condiciones necesarias. Los tres últimos ejes de las tres últimas articulaciones intersecan en un único punto en común que coincide con la muñeca del brazo robótico. Si nos imaginamos ese punto en el espacio del robot, su posición no varía cuando variamos cualquiera de esas tres últimas articulaciones (q_4 , q_5 y q_6), por tanto, estas no influyen en la posición final del robot y si en la orientación de este. Se tendrá que determinar las coordenadas del punto de intersección y obtener q_1 , q_2 , y q_3 .

Como se puede apreciar en la ilustración 54, la posición del punto de intersección en la muñeca no es la posición del extremo del robot y, así mismo, si tuviéramos conectada una herramienta deberíamos tener en cuenta esa distancia extra que nos aporta dentro del eje z (d_6). Por tanto, utilizamos un cambio de variable donde le restamos a la posición deseada la longitud de la pinza de agarre:

$$\begin{aligned}
 {}^0T_{muñeca}^{goal} &= {}^0T_6^{goal} * {}^6T_{muñeca} = {}^0T_6^{goal} * tras(0,0,-d_6) = \\
 &= \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x - d_6 a_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y - d_6 a_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z - d_6 a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ? & ? & ? & m_x \\ ? & ? & ? & m_y \\ ? & ? & ? & m_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Ilustración 58. Matriz cambio de variable

Se tendrá que resolver el problema de la posición para las tres primeras articulaciones q_1 , q_2 , y q_3 empleando el enfoque geométrico y el problema de la orientación para las últimas articulaciones q_4 , q_5 y q_6 empleando el enfoque algebraico.

4.3.1. Obtención de la posición

Mediante el teorema del coseno (enfoque geométrico) hallaremos q_1 , q_2 y q_3 y determinaremos la posición del punto de intersección de la muñeca del brazo robótico teniendo en cuenta el cambio de variable.

Para resolver la ecuación de la articulación 2 podemos emplear dos configuraciones diferentes, Codo arriba y Codo abajo. En este caso se emplea la configuración de Codo arriba.

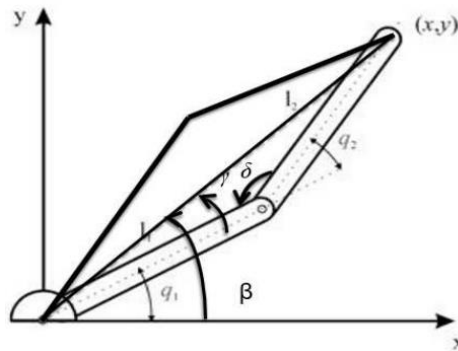


Ilustración 61. Configuración Codo Arriba/Codo Abajo

$$\theta = \arccos\left(\frac{27}{184.9}\right) = 81,6^\circ \quad (4.11)$$

Calculamos q_2 :

$$q_2 = \beta + \gamma \quad (4.12a)$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{m_z - 93}{m}\right) \quad (4.12b)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{l_1^2 + r^2 - l_2^2}{2 \cdot r \cdot l_1}\right) \quad (4.12c)$$

Sustituyendo las ecuaciones 4.12b y 4.12c en la ecuación 4.12a obtenemos la siguiente ecuación:

$$q_2 = \arctg\left(\frac{m_z - 93}{m}\right) + \arccos\left(\frac{l_1^2 + r^2 - l_2^2}{2 \cdot r \cdot l_1}\right) \quad (4.12d)$$

Calculamos q_3 :

$$q_3 = \theta - 180 + \delta \quad (4.13a)$$

$$\delta = \arccos\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - r^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2}\right) \quad (4.13b)$$

Sustituyendo las ecuaciones 4.11 y 4.13b en la ecuación 4.13a obtenemos la siguiente ecuación:

$$q_3 = \theta - 180 + \arccos\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - r^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2}\right) \quad (4.13c)$$

4.3.2. Obtención de la orientación

A continuación, hallaremos q_4 , q_5 y q_6 mediante el método algebraico.

Partiendo de la matriz 0R_6 (submatriz de rotación 0T_6) y siendo la orientación deseada:

$$\text{NOA} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Tenemos que:

$${}^0R_6 = \mathbf{noa} = {}^0R_3 \cdot {}^3R_6 \quad (4.14)$$

$${}^3R_6 = {}^3R_4 \cdot {}^4R_5 \cdot {}^5R_6 \quad (4.15)$$

Desarrollando la ecuación 4.15 obtenemos como resultado la siguiente matriz:

$${}^3R_6 = \begin{pmatrix} C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6 & -C_4 C_5 S_6 - S_4 C_6 & C_4 S_5 \\ S_4 C_5 C_6 + C_4 S_6 & -S_4 C_5 S_6 + C_4 C_6 & S_4 S_5 \\ -S_5 C_6 & S_5 S_6 & C_5 \end{pmatrix}$$

Despejando 3R_6 de la ecuación 4.14 obtenemos la siguiente expresión:

$$\left({}^0R_3\right)^{-1} \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6 & -C_4 C_5 S_6 - S_4 C_6 & C_4 S_5 \\ S_4 C_5 C_6 + C_4 S_6 & -S_4 C_5 S_6 + C_4 C_6 & S_4 S_5 \\ -S_5 C_6 & S_5 S_6 & C_5 \end{pmatrix}$$

Siendo:

$${}^0R_3^{-1} \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

Por último, sustituimos la matriz anterior obteniendo la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6 & -C_4 C_5 S_6 - S_4 C_6 & C_4 S_5 \\ S_4 C_5 C_6 + C_4 S_6 & -S_4 C_5 S_6 + C_4 C_6 & S_4 S_5 \\ -S_5 C_6 & S_5 S_6 & C_5 \end{pmatrix}$$

De esta última expresión extraemos las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} C_5 &= r_{33} \\ S_4 S_5 &= r_{23} \\ C_4 S_5 &= r_{13} \\ S_5 S_6 &= r_{32} \\ -S_5 C_6 &= r_{31} \end{aligned}$$

De estas ecuaciones obtenemos los valores de las articulaciones q_4 , q_5 y q_6 :

$$q_5 = \pm \arccos(r_{33}) \quad (4.16)$$

$$q_4 = \arctan2\left(\frac{r_{23}}{S_5}, \frac{r_{13}}{S_5}\right) \quad (4.17)$$

$$q_6 = \arctan2\left(\frac{r_{32}}{S_5}, \frac{-r_{31}}{S_5}\right) \quad (4.18)$$

Para la articulación q_5 podemos elegir el tipo de configuración deseada:

$q_5 > 0$ Configuración “flip” Elegida

$q_5 < 0$ Configuración “noflip”

En el **Apéndice A** se puede observar el código de MATLAB utilizado para la obtención de la cinemática.

5. Control del brazo robótico

A lo largo del siguiente apartado se procederá a explicar el proceso que se ha seguido para lograr programar el brazo robótico en Arduino de manera que logre emular tareas de manipulación de objetos. Se expondrá tanto el código implementado en Arduino como el esquema de conexión electrónico de todos los componentes necesarios. Se implementarán diversas rutinas dentro del código de control para que el robot realice diversas tareas.

5.1. Montaje del circuito electrónico

Una vez el brazo robótico quede ensamblado se procede a realizar las conexiones de los demás componentes necesarios para el control del mismo. La fuente de alimentación, los 7 servomotores, la placa protoboard y la placa Arduino. La placa protoboard servirá para distribuir de forma ordenada y clara todas las conexiones.

El esquema es el siguiente:

- La fuente de alimentación estará conectada a la placa protoboard obteniendo un positivo y un negativo.
- El cable positivo de los servomotores estará conectado a la línea positiva de la placa protoboard.
- El cable negativo de los servomotores estará conectado a la línea negativa de la placa protoboard.
- El cable de control de los servomotores estará conectado a su correspondiente pin de entrada de la placa Arduino.
- La placa Arduino conectará su positivo y su negativo a la placa protoboard.

Pin de entrada	Control
07	Base
08	Hombro
09	Codo
10	Muñeca 1
11	Muñeca 2
12	Muñeca 3
13	Pinza

Tabla 7. Correspondencia pines y servomotores

Se ha realizado primeramente el conexionado en el programa TinkerCAD [15] y se ha simulado para comprobar que las conexiones eran las correctas y no se producía ningún cortocircuito.

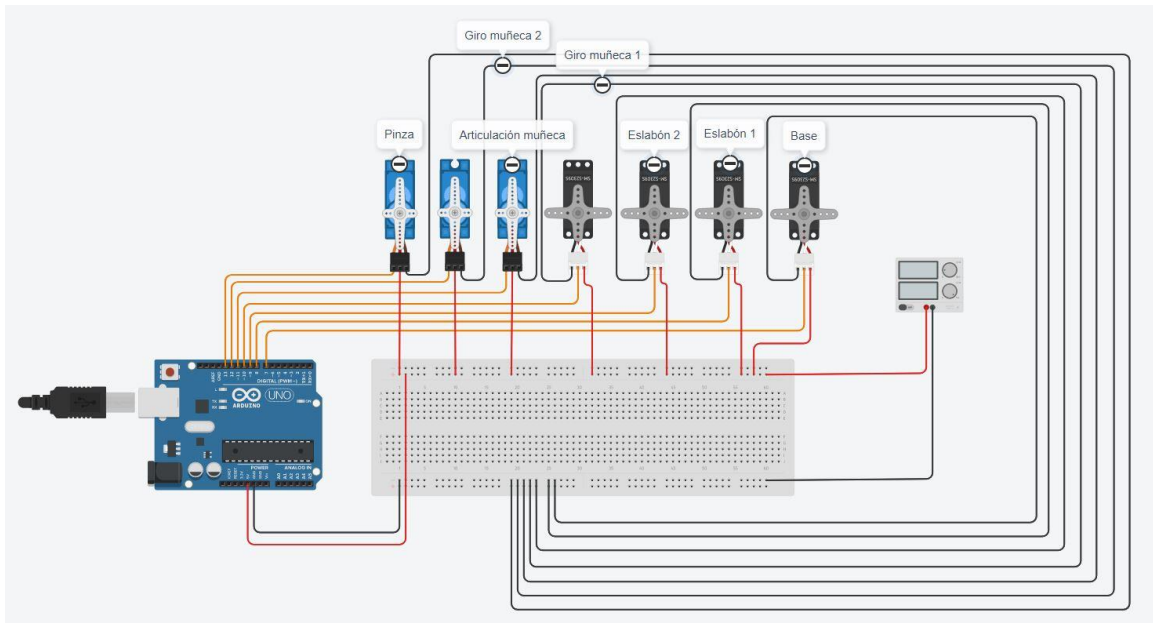


Ilustración 62. Montaje circuito

5.2. Código de control

El código de control del brazo robótico del proyecto se realiza mediante la plataforma Arduino. Generando un código en la aplicación, la placa Arduino actuará de microcontrolador procesando los datos que le llegan del usuario a través del puerto serie y enviando las señales correspondientes a los diferentes servomotores. Esta señal que llega al servomotor se trata de una señal PWM (modulación por ancho de pulsos), se trata de una modificación del ciclo de trabajo de una señal periódica que en este caso permite controlar el movimiento del servomotor.

El funcionamiento de los servomotores de 180° es simple, se procesa un pulso con un periodo de 20 ms para efectuar el movimiento del servomotor. En la ilustración 63 se indica el tiempo que se debe emitir el pulso para posicionar el servomotor en los diferentes ángulos. [16]

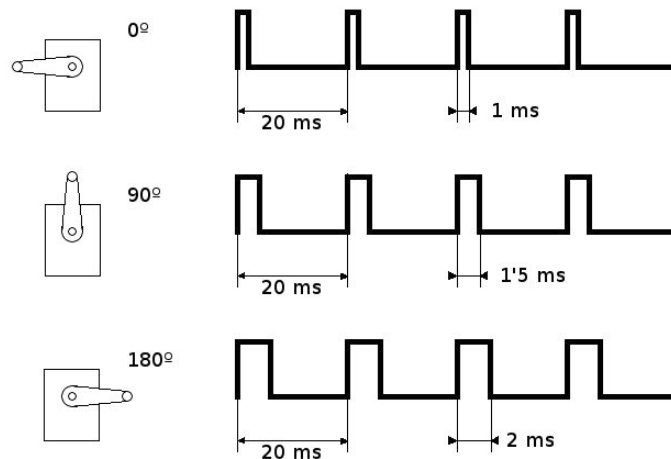


Ilustración 63. Señal PWM en servomotor

Dentro del entorno de programación los comandos [17] más frecuentes que se van a utilizar son los siguientes:

<code>#include <Servo.h></code>	Incluye la librería que permite controlar diferentes tipos de servomotores
<code>Servo servoXX;</code>	Definimos el nombre del servomotor
<code>servoXX.attach(X);</code>	Definimos el pin de entrada de la placa Arduino del servomotor
<code>servoXX.write(XX°);</code>	Le transmitimos al servomotor que se mueva a la posición asignada
<code>serial.print ()</code>	Imprime datos en el monitor serie
<code>while ()</code>	Crea un bucle hasta que la condición impuesta en el paréntesis sea falsa
<code>switch case ()</code>	Controla el flujo del programa de manera que se ejecuta el código indicado según la variable case introducida
<code>Serial.parseInt()</code>	Busca el siguiente entero válido en la serie entrante

Tabla 8. Comandos más comunes en Arduino

Antes de realizar los diferentes programas de los que dispondrá el brazo robótico se ha procedido a calibrar la posición de todos los servomotores. En este caso se ha decidido ubicar los motores en la posición 90° siendo esta la posición correspondiente a la posición de reposo del brazo robótico.

El primer programa se trata de un programa de verificación del correcto funcionamiento de todos los eslabones del brazo robótico. Para ello se moverán los servomotores correspondientes a cada eslabón uno a uno dentro de su rango de movimiento y volverán a la posición de reposo. Se utiliza la función `servoXX.write(XX°)`. También se ha incluido el comando `serial.print()` en el código, el usuario podrá comprobar en el monitor serie de qué trata el programa y que servomotores se está ejecutando en cada momento para poder identificarlo fácilmente en caso de fallo. Estos comandos se han incluido en un bucle `while()` que solamente se repite una vez.

Este programa se ejecutará en primera instancia siempre que se vaya a trabajar con el brazo robótico tal y como se indica en el apartado Pliego de condiciones, Pruebas de servicio.

El segundo programa se trata de un programa donde el usuario podrá introducir a través del monitor serie las coordenadas articulares deseadas para los diferentes eslabones. Se podrá elegir qué eslabón se desea mover y cuántos grados. El programa preguntará qué eslabón se desea mover y acto seguido, si se corresponde con un eslabón definido, preguntará la posición en grados a la que se quiere mover. Si el número de eslabón introducido no es correcto el programa avisará mediante un mensaje en el monitor serie y volverá a preguntar qué eslabón se desea mover. Se ejecutará en bucle de manera que se podrán realizar todos los movimientos deseados. Solo al introducir el valor de cierre de programa el bucle se detendrá y el programa acabará.

Una vez realizados los dos programas en el entorno de Arduino se comprueba su correcto funcionamiento en TinkerCAD. Es posible simular los dos programas igual que lo haríamos en un laboratorio físicamente. Se introduce el bloque de código creado en Arduino y se inicia la simulación. Gracias a esta herramienta se ha podido verificar el correcto funcionamiento de los dos programas antes de ejecutarlos en el brazo robótico. En la ilustración 64 se muestra a la izquierda el montaje del circuito y a la derecha el código empleado.

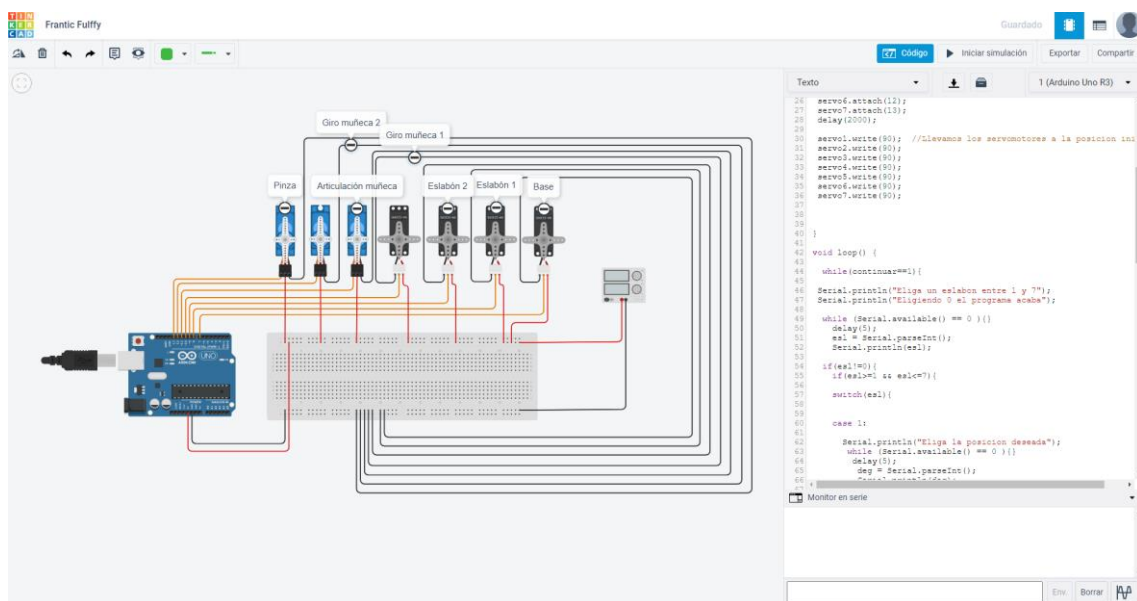


Ilustración 64. Entorno simulación TinkerCAD

En el **Apéndice B** se pueden apreciar los dos códigos realizados para cada programa.

6. Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto era realizar la maqueta de un brazo robótico que fuera capaz de emular tareas de manipulación de objetos. Por tanto, el objetivo se ha cumplido. Se han seguido los diferentes objetivos secundarios hasta llegar a la solución planteada al principio del proyecto.

Durante la realización del proyecto han surgido pequeños problemas que han requerido la adaptación del mismo para poder cumplir con lo propuesto. En un principio la pieza denominada Muñeca 2 era un conjunto por lo que cuando se imprimió en 3D y se intentó colocar su correspondiente servomotor se vio que no se disponía de suficiente holgura para introducirlo. Se rediseñó la pieza y se volvió a imprimir. En el proceso de desmoldeo de la pieza denominada Muñeca 1 se produjo una leve rotura en una de sus partes y ha impedido sujetar el servomotor correspondiente por sus dos sujeciones. Como consecuencia la parte de la pinza de agarre se inclina unos pocos grados por debajo de la horizontal.

Por otra parte, si bien es cierto que el brazo robótico cumple con el objetivo establecido, su funcionamiento se puede mejorar. La velocidad de los servomotores puede ser demasiado brusca en ciertos eslabones y, por tanto, si el brazo robótico fuera a desempeñar tareas de manipulación delicadas y de mayor precisión habría que solucionar ese aspecto. Para ello se podría implementar un perfil de velocidad trapezoidal a los servomotores, de esta manera el incremento de velocidad sería progresivo. En la industria robótica todos los robots cuentan con este sistema para reducir sus velocidades a la hora de acercarse a los puntos de trabajo. Resulta imprescindible para la seguridad en el entorno de trabajo. Se hubiera querido implementar en el proyecto pero no se ha contado con tiempo suficiente, se tendrá en cuenta para futuros proyectos.

Por último, se ha comprobado la viabilidad de utilizar piezas fabricadas en impresora 3D. Al tratarse de piezas pequeñas y que no deben soportar grandes cargas este método resulta el más rápido y económico. Con los nuevos avances en impresión 3D se están realizando piezas de metal con grandes características mecánicas. Se tendrá en cuenta en futuros proyectos que se puedan dar.

Bibliografía

[1] Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al Robot da Vinci. (Parte II). Sánchez-Martín FM, Jiménez Schlegl P, Millán Rodríguez F, Salvador-Bayarri J, Monllau Font V, Palou Redorta J, Villavicencio Mavrich H. Servicio de Urología. Fundació Puigvert. Barcelona. Institut de Robòtica Industrial (IRI). Univ. Politècnica de Catalunya. CSIC.

[2] Descripción del software Fusion 360 [en línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.es/products/fusion-360/overview>

[3] López-Nicolás, G., Romeo, A. y Guerrero, JJ (2014). “Aprendizaje activo en robótica basado en herramientas de simulación.” Aplicaciones informáticas en la enseñanza de la ingeniería, 22: 509–515.

[4] Descripción del software TinkerCad [en línea]. Disponible en: <https://www.tinkercad.com/>

[5] Descripción del software MATLAB [en línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

[6] ARDUINO. Arduino [software]. Versión 1.8.15. Disponible en: <http://arduino.cc/en/Main/Software>

[7] Catalogo técnico servomotor SG90. Disponible en: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/791970/TowerPro/SG90/1>

[8] Catalogo técnico servomotor MG996R. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/1131873/ETC2/MG996R.html>

[9] Descripción Placa Elegoo Uno R3. Disponible en: https://www.amazon.es/Tarjeta-Microcontrolador-ATmega328P-ATMEGA16U2-Compatible/dp/B01M7ZB2B4/ref=sr_1_1_sspa?_mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=elegoo+uno&qid=1631265933&sr=8-1-spons&psc=1&spLa=ZW5jenlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUFNUE44SUMwWIM2Nk8mZW5jenlwdGVkSWQ9QTA1MDgyNzAyREQ5UIAxREpCTk1VJmVuY3J5cHRIZEFkSWQ9QTA2NDQ5NTQyRUFPRTA5MzFQREhWJndpZGdlldE5hbWU9c3BfYXRmJmFjdGlvbj1jbGlja1JlZGlyZWNOJmRvTm90TG9nQ2xpY2s9dHJlZQ==

[10] González Sorribes, Antonio. Introducción morfología del robot. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISA), Universitat Politècnica de València.

[11] Barrientos, Antonio. Peñin, Luis Felipe. Balaguer, Carlos. Aracil Santoja, Rafael. Fundamentos de robótica. 2ª ED. McGraw Hill. 2007.

[12] González Sorribes, Antonio. Representación de la posición y orientación. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISA), Universitat Politècnica de València.

[13] González Sorribes, Antonio. Cinemática directa del robot. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISA), Universitat Politècnica de València.

[14] González Sorribes, Antonio. Cinemática inversa del robot. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISA), Universitat Politècnica de València.

[15] Autodesk. TinkerCAD 2011 [software]. Disponible en: <https://www.tinkercad.com/>

[16] Como usar un Servomotor con Arduino (180° y 360°) [en línea]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/servomotor/>

[17] Arduino, Referencia idiomática [en línea]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/reference/en/>

[18] Juan Carlos Rodríguez Zambrana. Modelo cinemático y control de un brazo robótico imprimible. Dirigido por Alberto Valero Gómez. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. Trabajo fin de carrera.

Apéndice A - Cálculos cinemáticos

En este apartado se muestra el código empleado en MATLAB para obtener y validar la cinemática del brazo robótico.

```
1 - syms q1 q2 q3 q4 q5 q6
2 - T_01 = trotz(q1, 'deg')*transl(0,0,0.0936)*transl(0,0,0)*trotx(-90, 'deg')
3 - T_12 = trotz(q2, 'deg')*transl(0,0,-0.05)*transl(0.214,0,0)*trotx(0, 'deg')
4 - T_23 = trotz(q3, 'deg')*transl(0,0,0)*transl(0.027,0,0)*trotx(-90, 'deg')
5 - T_34 = trotz(q4, 'deg')*transl(0,0,0.183)*transl(0,0,0)*trotx(90, 'deg')
6 - T_45 = trotz(q5, 'deg')*transl(0,0,0)*transl(0,0,0)*trotx(-90, 'deg')
7 - T_56 = trotz(q6, 'deg')*transl(0,0,0.170)*transl(0,0,0)*trotx(0, 'deg')
8
9 - T_06=T_01*T_12*T_23*T_34*T_45*T_56
10
11 - double(subs(T_06, [q1,q2,q3,q4,q5,q6], [0,-90,0,0,0,0]))
12
13 - m = sqrt(0.183^2 + 0^2)
14 - y=0
15 - x=m
16 - z=0.3346-0.093
17 - r=sqrt(z^2 + x^2)
18
19 - q_1=atan2d(y,x)
20 - q_2=(atan2d(z,x)+ acosd((0.214^2+r^2-0.183^2)/(2*r*0.214)))
21 - q_3=round(acosd((0.214^2-r^2+0.183^2)/(2*0.214*0.183))-180 + 81.6)
22
23 - NOA=[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1]
24
25 - T_03=T_01*T_12*T_23
26
27 - R_03=T_03(1:3,1:3)
28
29 - T_36=T_34*T_45*T_56
30
31 - R_36=T_36(1:3,1:3)
32
33 - R=inv(R_03)*NOA
34
35 - r33= R(3,3)
36 - r13= R(1,3)
37 - r23= R(2,3)
38 - r32= R(3,2)
39 - r31= R(3,1)
```


Apéndice B – Código Arduino

A continuación, se mostrarán los dos códigos de los programas realizados mediante Arduino.

B.1. Programa de verificación

```
#include <Servo.h>

Servo servo1; //Declaramos los servomotores
Servo servo2;
Servo servo3;
Servo servo4;
Servo servo5;
Servo servo6;
Servo servo7;

int variable=0; //Declaramos las variables

void setup() {

servo1.attach(7); //Definimos los pines de los servomotores
servo2.attach(8);
servo3.attach(9);
servo4.attach(10);
servo5.attach(11);
servo6.attach(12);
servo7.attach(13);
delay(2000);

Serial.print("Programa de verificación"); //Mensaje que aparece en el monitor serie
delay(2000);
Serial.print("Comprobaremos el correcto funcionamiento de los servomotores");
delay(2000);

servo1.write(90); //Posiciones iniciales de los servomotores
servo2.write(90);
servo3.write(90);
servo4.write(90);
servo5.write(90);
servo6.write(90);
servo7.write(90);

}
```

```

void loop() { //Código que se repetirá

while(variable<1){ //Bucle del programa
  Serial.print("Primer Eslabón"); //Mensaje que aparece en el monitor serie
  servol.write(0); //El servomotor se mueve a la posicion indicada
  delay(2000);
  servol.write(180);
  delay(2000);
  servol.write(90);
  delay(4000);

  Serial.print("Segundo Eslabón"); //Mensaje que aparece en el monitor serie
  servo2.write(70); //El servomotor se mueve a la posicion indicada
  delay(2000);
  servo2.write(130);
  delay(2000);
  servo2.write(90);
  delay(4000);

  Serial.print("Tercer Eslabón"); //Mensaje que aparece en el monitor serie
  servo3.write(70); //El servomotor se mueve a la posicion indicada
  delay(2000);
  servo2.write(130);
  delay(2000);
  servo3.write(90);
  delay(4000);

  Serial.print("Cuarto Eslabón"); //Mensaje que aparece en el monitor serie
  servo4.write(0); //El servomotor se mueve a la posicion indicada
  delay(2000);
  servo4.write(180);
  delay(2000);
  servo4.write(90);
  delay(4000);

  Serial.print("Quinto Eslabón"); //Mensaje que aparece en el monitor serie
  servo5.write(0); //El servomotor se mueve a la posicion indicada
  delay(2000);
  servo2.write(180);
  delay(2000);
  servo5.write(90);
  delay(4000);

  Serial.print("Sexto Eslabón"); //Mensaje que aparece en el monitor serie
  servo6.write(0); //El servomotor se mueve a la posicion indicada
  delay(2000);
  servo6.write(180);
  delay(2000);
  servo6.write(90);
  delay(4000);

  Serial.print("Pinza de agarre"); //Mensaje que aparece en el monitor serie
  servo7.write(180); //El servomotor se mueve a la posicion indicada
  delay(2000);
  servo7.write(90);
  delay(4000);

  variable=variable+1; //Cambio de variable para cerrar el programa
  delay(1000);
}
}

```


B.2. Programa movimiento eslabones

```
#include <Servo.h>

Servo servo1; //Declaramos los servomotores
Servo servo2;
Servo servo3;
Servo servo4;
Servo servo5;
Servo servo6;
Servo servo7;

int esl=0, deg=0, continuar=1; //Declaramos las variables

void setup() {

  Serial.begin(9600); //Iniciamos el monitor serie

  servo1.attach(7); //Definimos los pines de los servomotores
  servo2.attach(8);
  servo3.attach(9);
  servo4.attach(10);
  servo5.attach(11);
  servo6.attach(12);
  servo7.attach(13);
  delay(2000);

  servo1.write(90); //Posiciones iniciales de los servomotores
  servo2.write(90);
  servo3.write(90);
  servo4.write(90);
  servo5.write(90);
  servo6.write(90);
  servo7.write(90);

}

void loop() { //Código que se repetirá

  while(continuar==1){ //Bucle del programa

  Serial.println("Elija un eslabon entre 1 y 7"); //Mensaje que aparece en el monitor serie
  Serial.println("Elijiendo 0 el programa acaba"); //Mensaje que aparece en el monitor serie
```

```

while (Serial.available() == 0 ){} //Lee el valor introducido en el monitor serie
  delay(5);
  esl = Serial.parseInt(); //Recoge el valor en la variable esl y lo convierte a integer
  Serial.println(esl); //Mensaje que aparece en el monitor serie

if(esl!=0){ //Función if que lee si el valor esl es diferente a 0
  if(esl>=1 && esl<=7){ //Función if que lee si el valor esl se encuentra entre 1 y 7

  switch(esl){ //Se ejecuta el switch case en funcion del valor esl

  case 1: //Cuando esl=1, eslabon 1

  Serial.println("Eliga la posicion deseada en grados"); //Mensaje que aparece en el monitor serie
  while (Serial.available() == 0 ){} //Lee el valor introducido en el monitor serie
  delay(5);
  deg = Serial.parseInt(); //Recoge el valor en la variable deg y lo convierte a integer
  Serial.println(deg); //Mensaje que aparece en el monitor serie
  delay(5);
  servol.write(deg); //El servomotor 1 se mueve a la posicion indicada
  delay(2000);
  break; //Finaliza el case

  case 2: //Cuando esl=2, eslabon 2

  Serial.println("Eliga la posicion deseada en grados. Rango 70-130 grados");
  while (Serial.available() == 0 ){}
  delay(5);
  deg = Serial.parseInt();
  Serial.println(deg);
  if(deg>=70 && deg<=130){
  delay(5);
  servo2.write(deg);
  delay(2000);
  }else{
  Serial.println("No entra en el rango válido");
  }
  break;

  case 3: //Cuando esl=3, eslabon 3

  Serial.println("Eliga la posicion deseada en grados. Rango 70-130 grados");
  while (Serial.available() == 0 ){}
  delay(5);
  deg = Serial.parseInt();
  Serial.println(deg);
  if(deg>=70 && deg<=130){
  Serial.println(deg);
  delay(5);
  servo3.write(deg);
  delay(2000);
  }else{
  Serial.println("No entra en el rango válido");
  }
  break;

```

```

case 4: //Cuando esl=4, eslabon 4

Serial.println("Eliga la posicion deseada en grados");
while (Serial.available() == 0){}
delay(5);
deg = Serial.parseInt();
Serial.println(deg);
delay(5);
servo4.write(deg);
delay(2000);
break;

case 5: //Cuando esl=5, eslabon 5

Serial.println("Eliga la posicion deseada en grados");
while (Serial.available() == 0){}
delay(5);
deg = Serial.parseInt();
Serial.println(deg);
delay(5);
servo5.write(deg);
delay(2000);
break;

case 6: //Cuando esl=6, eslabon 6

Serial.println("Eliga la posicion deseada en grados");
while (Serial.available() == 0){}
delay(5);
deg = Serial.parseInt();
Serial.println(deg);
delay(5);
servo6.write(deg);
delay(2000);
break;

case 7: //Cuando esl=7, pinza de agarre

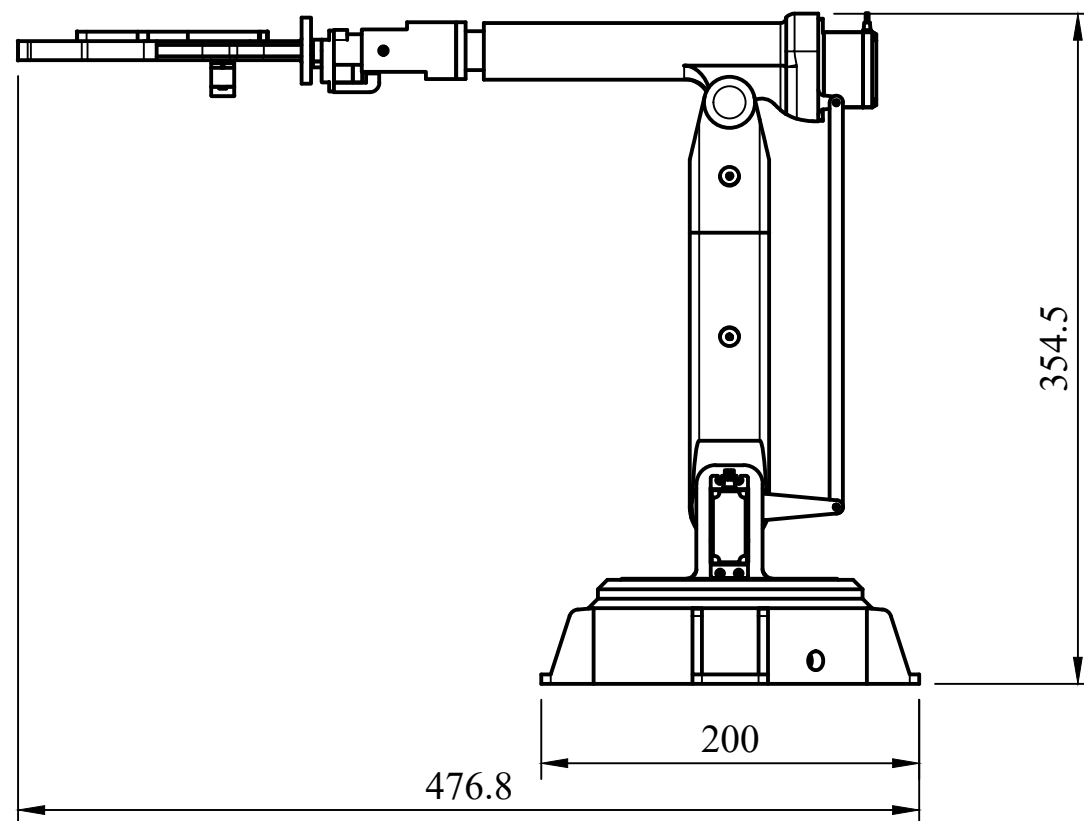
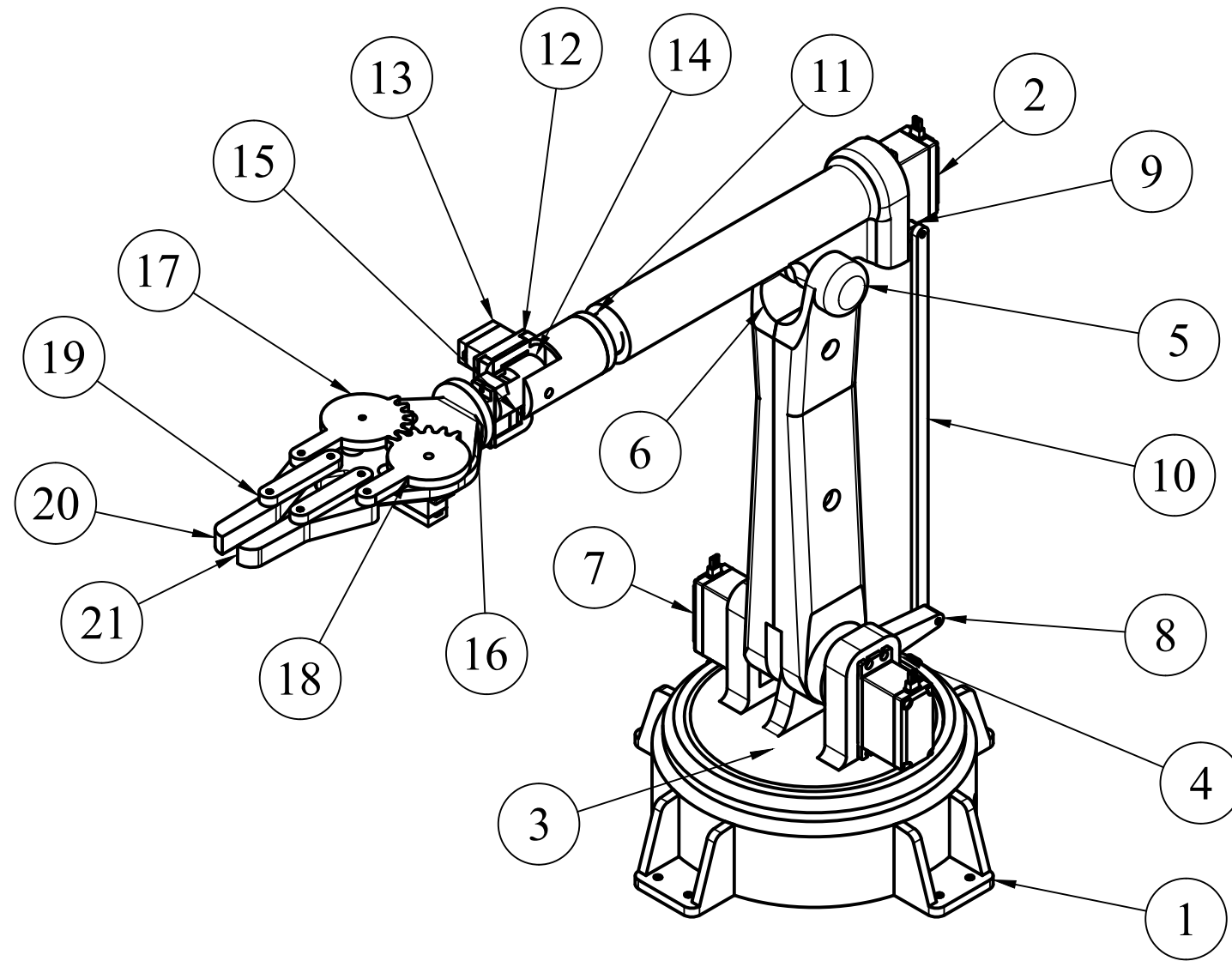
Serial.println("Eliga la posicion deseada en grados");
while (Serial.available() == 0){}
delay(5);
deg = Serial.parseInt();
Serial.println(deg);
delay(5);
servo7.write(deg);
delay(2000);
break;
}

}else{ //Si se introduce un eslabon incorrecto
Serial.println("No corresponde a ningun eslabon");
delay(1000);
}
}else
continuar=0; //Se cierra el programa
}
}

```


Parte II

Planos



21	1	Pinza Izquierda
20	1	Pinza Derecha
19	2	Biela
18	1	Engranaje 1
17	1	Engranaje 2
16	1	Base Pinza
15	1	Muñeca 2 parte 2
14	1	Muñeca 2 parte 1
13	3	Sg90
12	1	Muñeca 1
11	1	Interior Eslabón 3
10	1	Varilla de transmisión
9	1	Eslabón 3
8	1	Enganche
7	2	Servo Motor MG996R With Attachments
6	1	Eslabón 2 parte izquierda
5	1	Eslabón 2 parte derecha
4	2	Soporte Motor
3	1	Placa Rotación
2	2	Servo Motor MG996R With Attachments 2
1	1	Base
elemento	ctd	número de pieza
Lista de piezas		

PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO
 TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA
 REFERENCIA: 01-TFG

FECHA: Agosto-2021

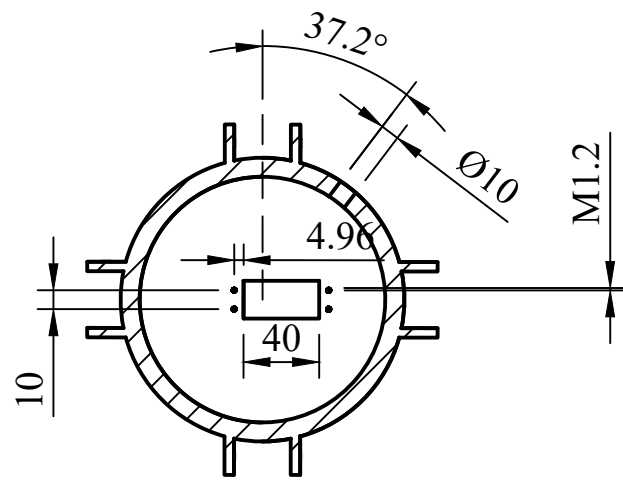
ESCALA
1:4

AUTOR: FERRAN PASCUAL
 GRIÑÁN

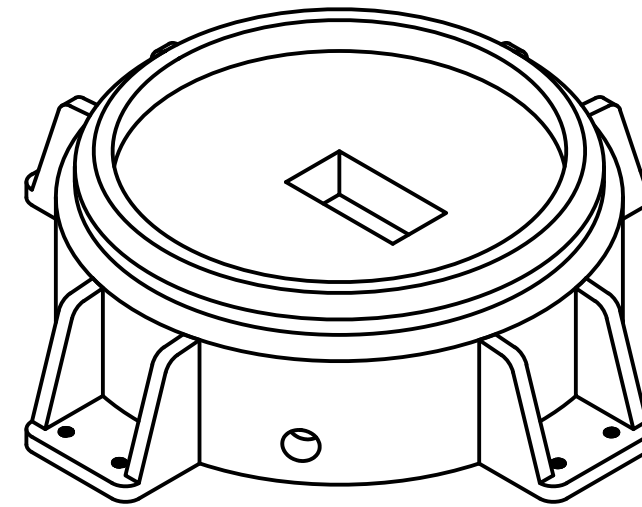
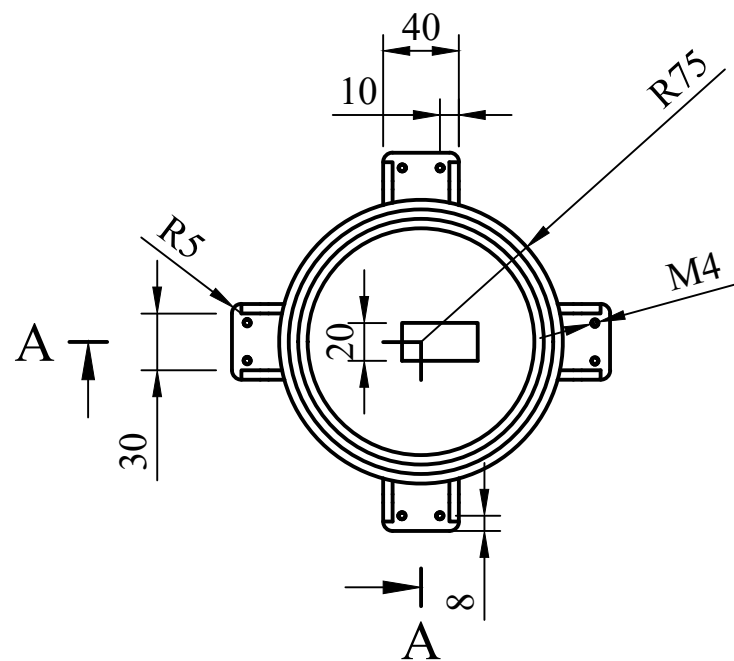
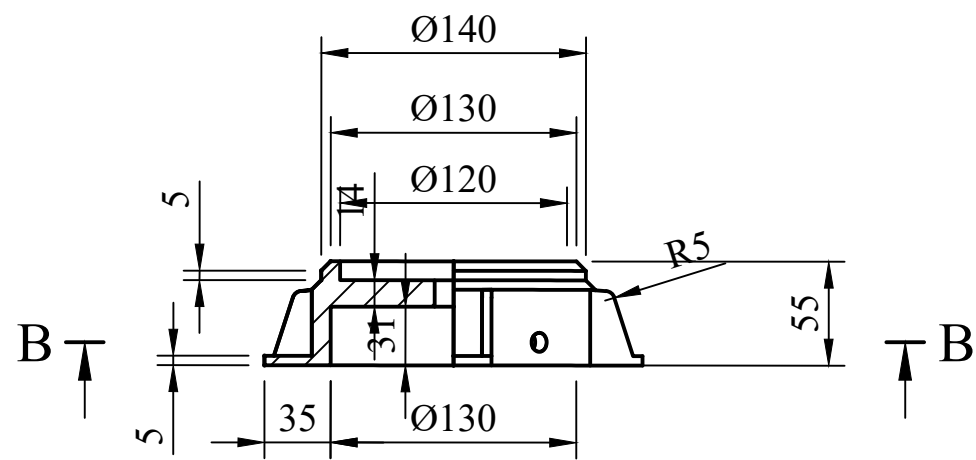
PLANO:
 ENSAMBLAJE PRINCIPAL

PLANO N°
00

B-B (1:4)



A-A (1:4)



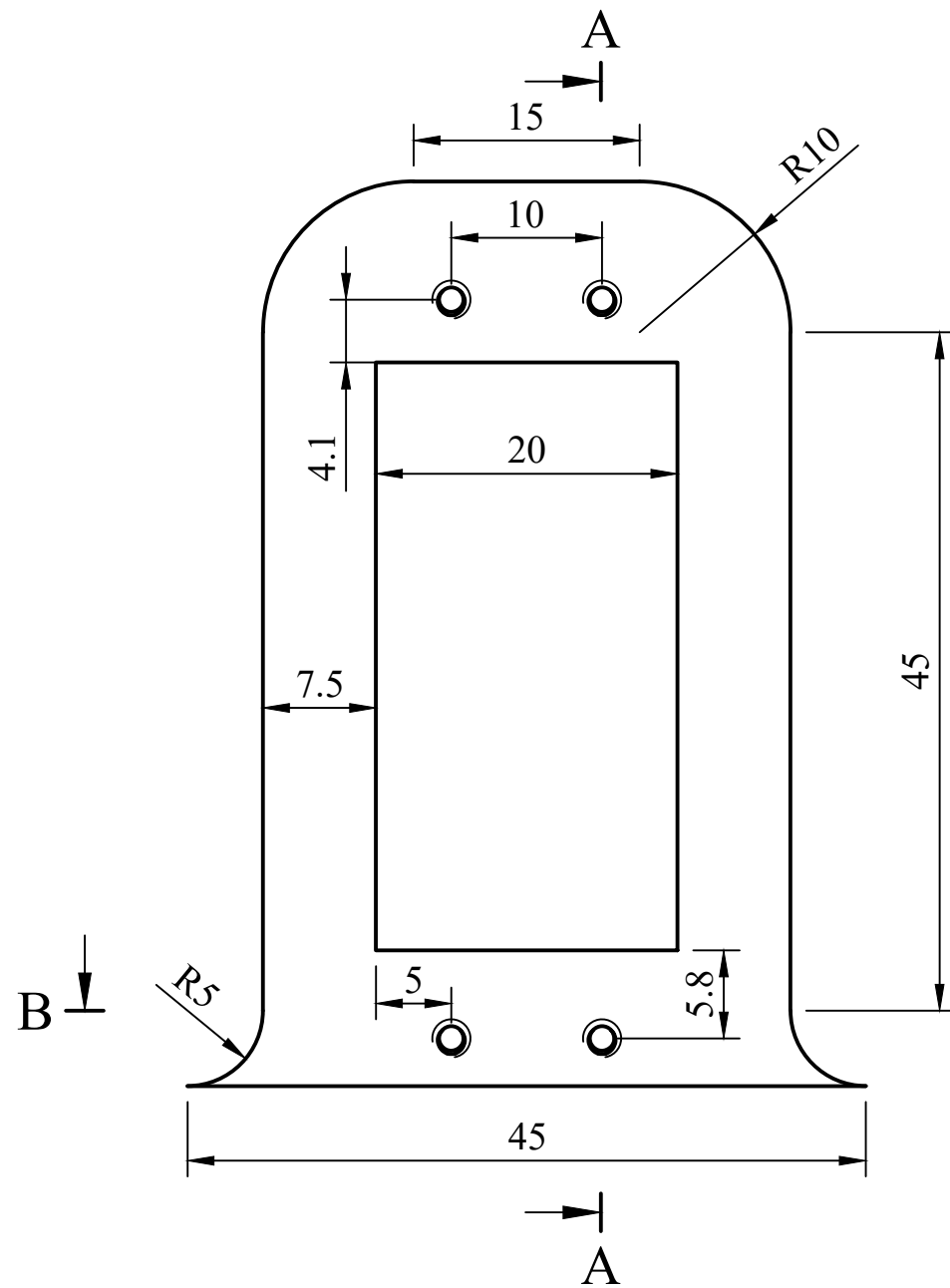
PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN
BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO
TITULAR: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
REFERENCIA: 01-TFG

FECHA: Agosto-2021

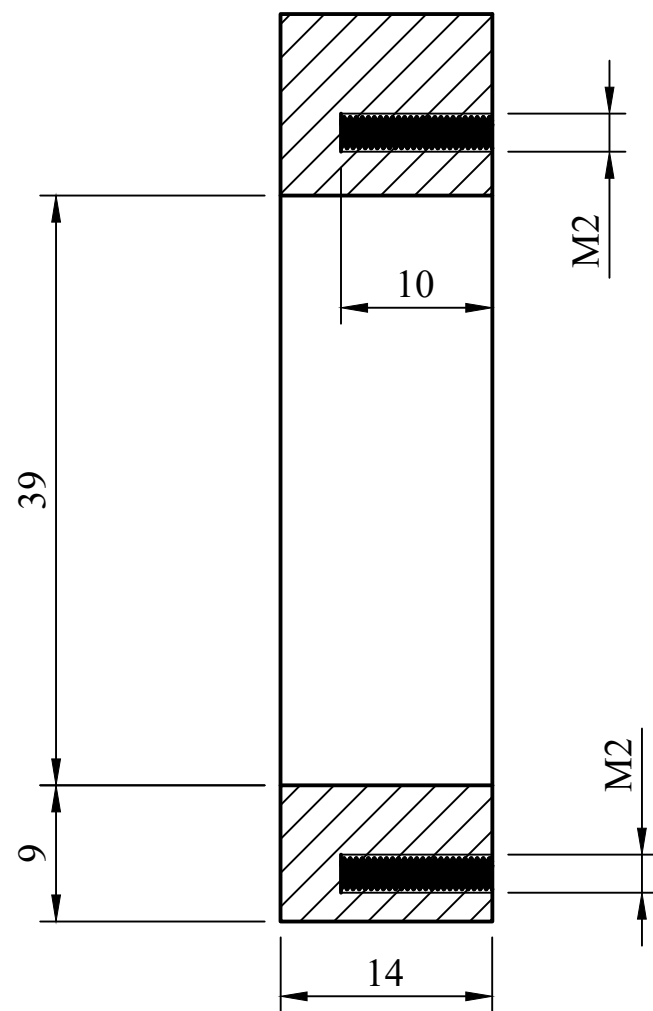
ESCALA
1:4

AUTOR: FERRAN PASCUAL
GRINÁN
PLANO:
BASE

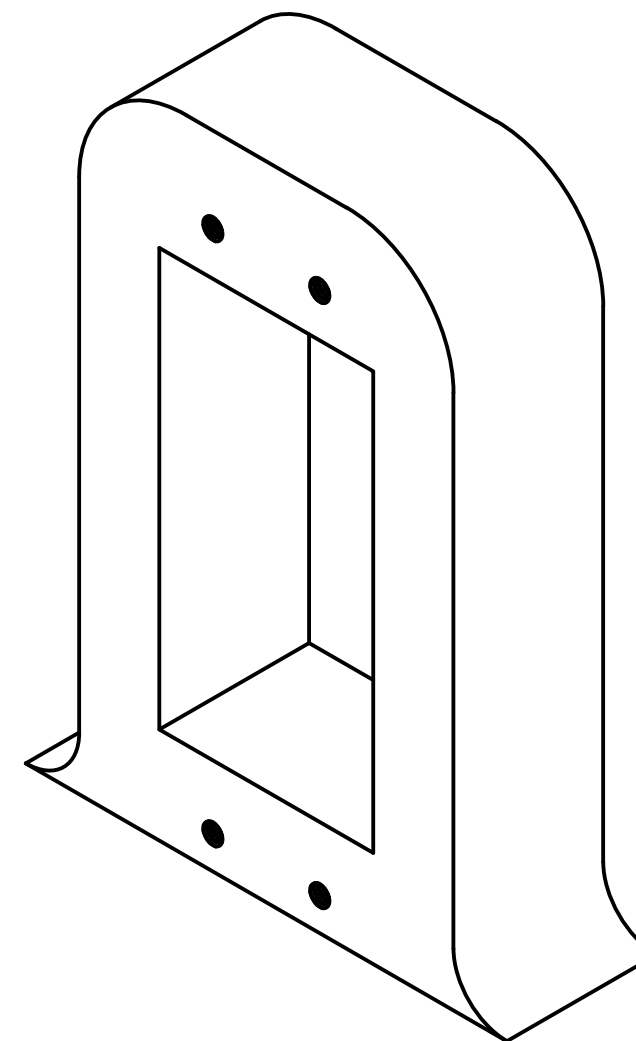
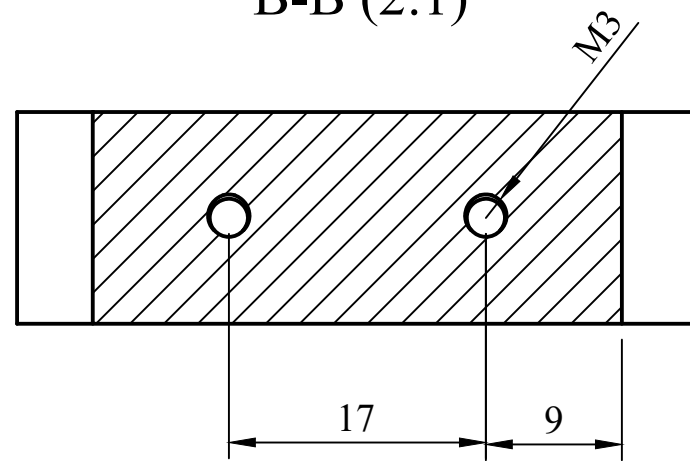
PLANO N°
01



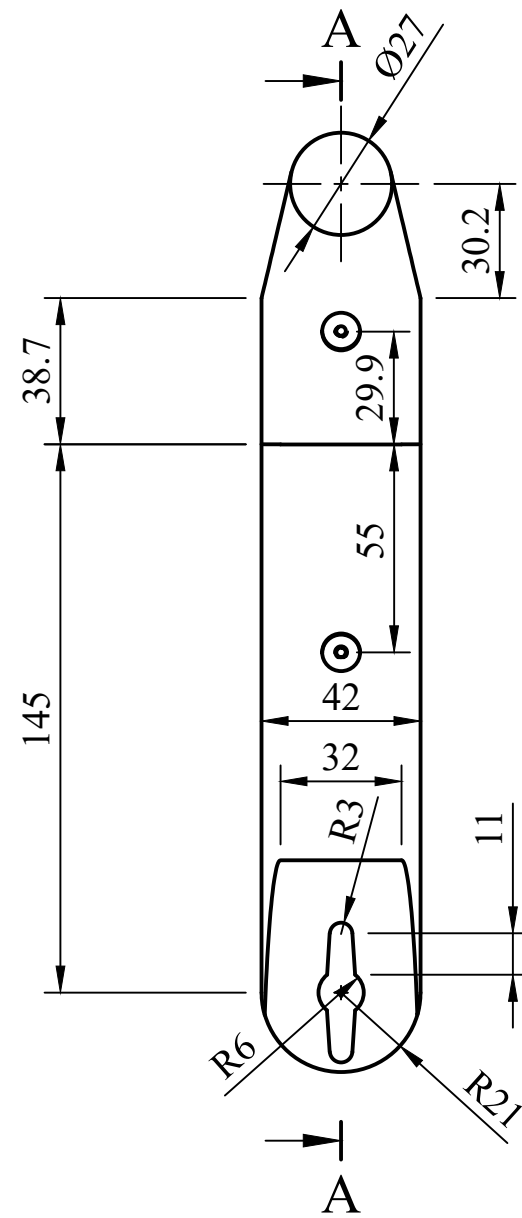
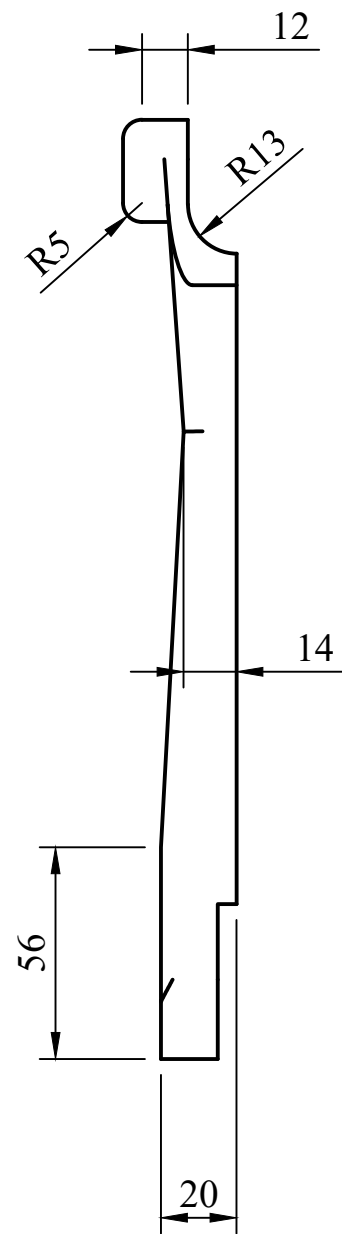
A-A (2:1)



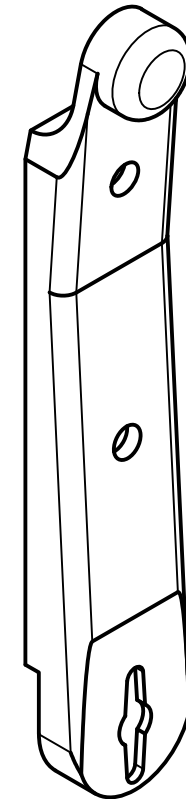
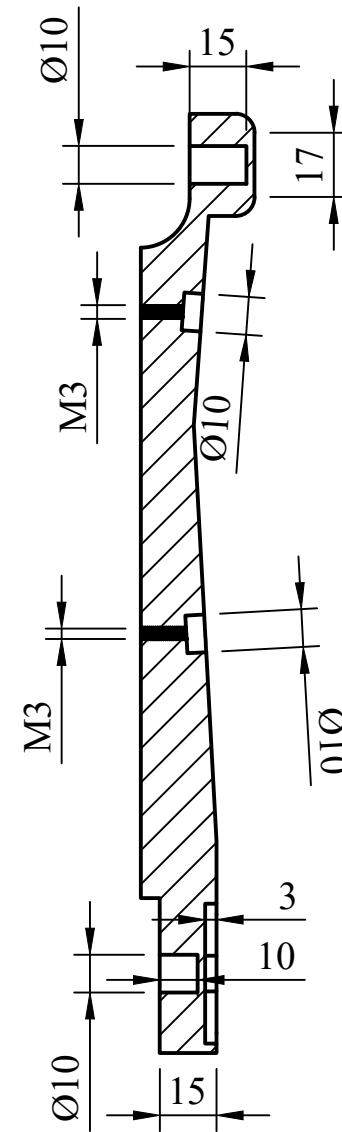
B-B (2:1)



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA REFERENCIA: 01-TFG		FECHA: Agosto-2021
AUTOR: FERRAN PASCUAL GRIÑÁN		ESCALA 2:1
PLANO: SOPORTE MOTOR		PLANO N° 03



A-A (1:2)



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO
 TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA
 REFERENCIA: 01-TFG

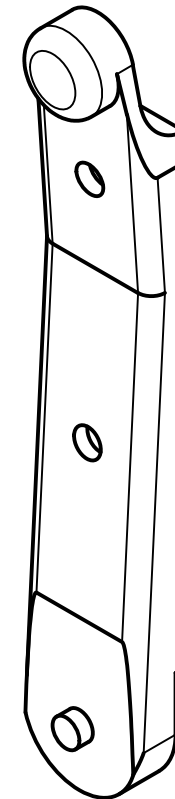
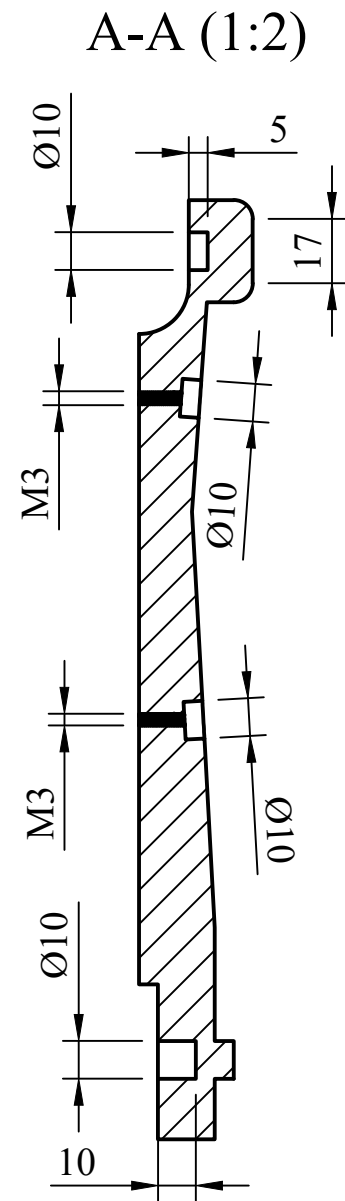
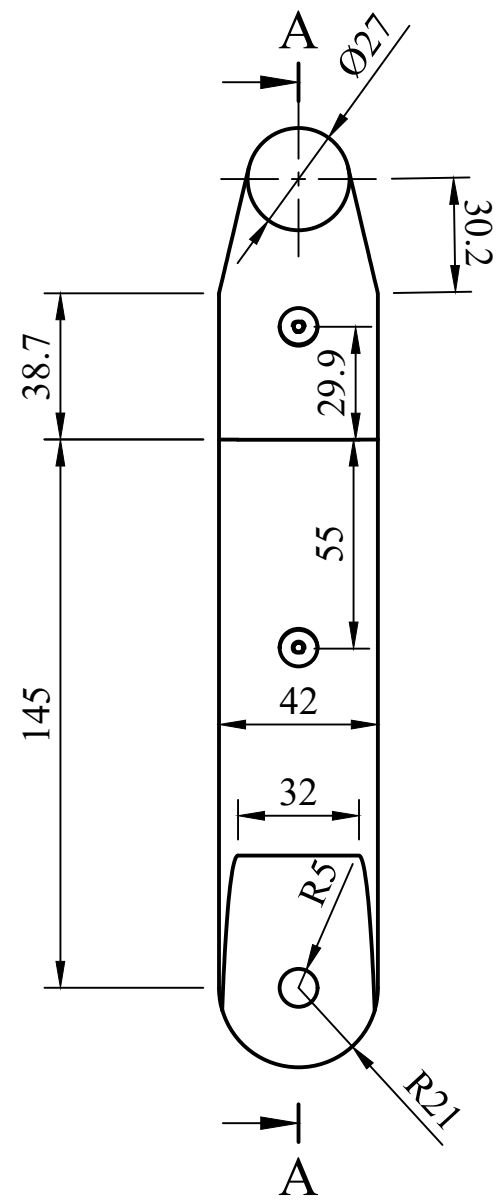
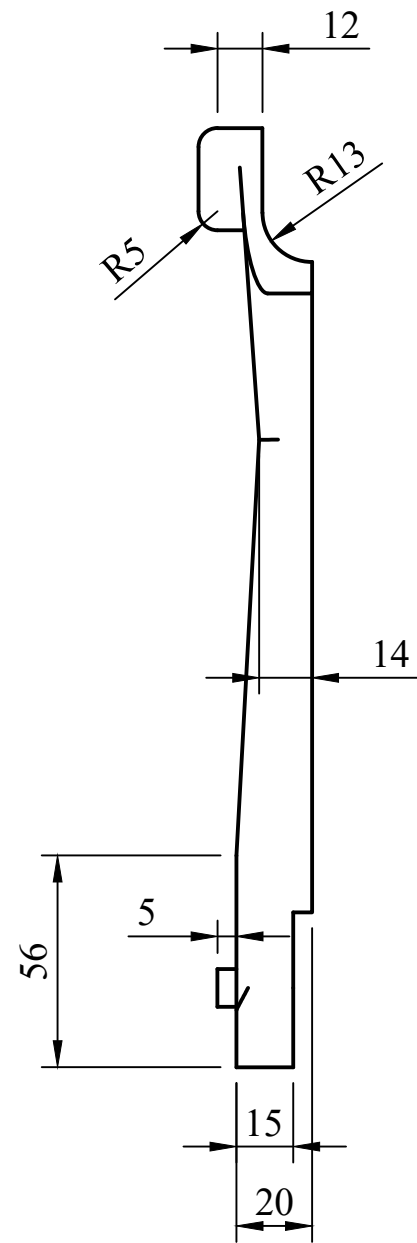
FECHA: Agosto-2021

ESCALA
1:2

AUTOR: FERRAN PASCUAL
 GRIÑÁN

PLANO:
 ESLABÓN 2 PARTE IZQUIERDA

PLANO N°
04



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO
 TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA
 REFERENCIA: 01-TFG

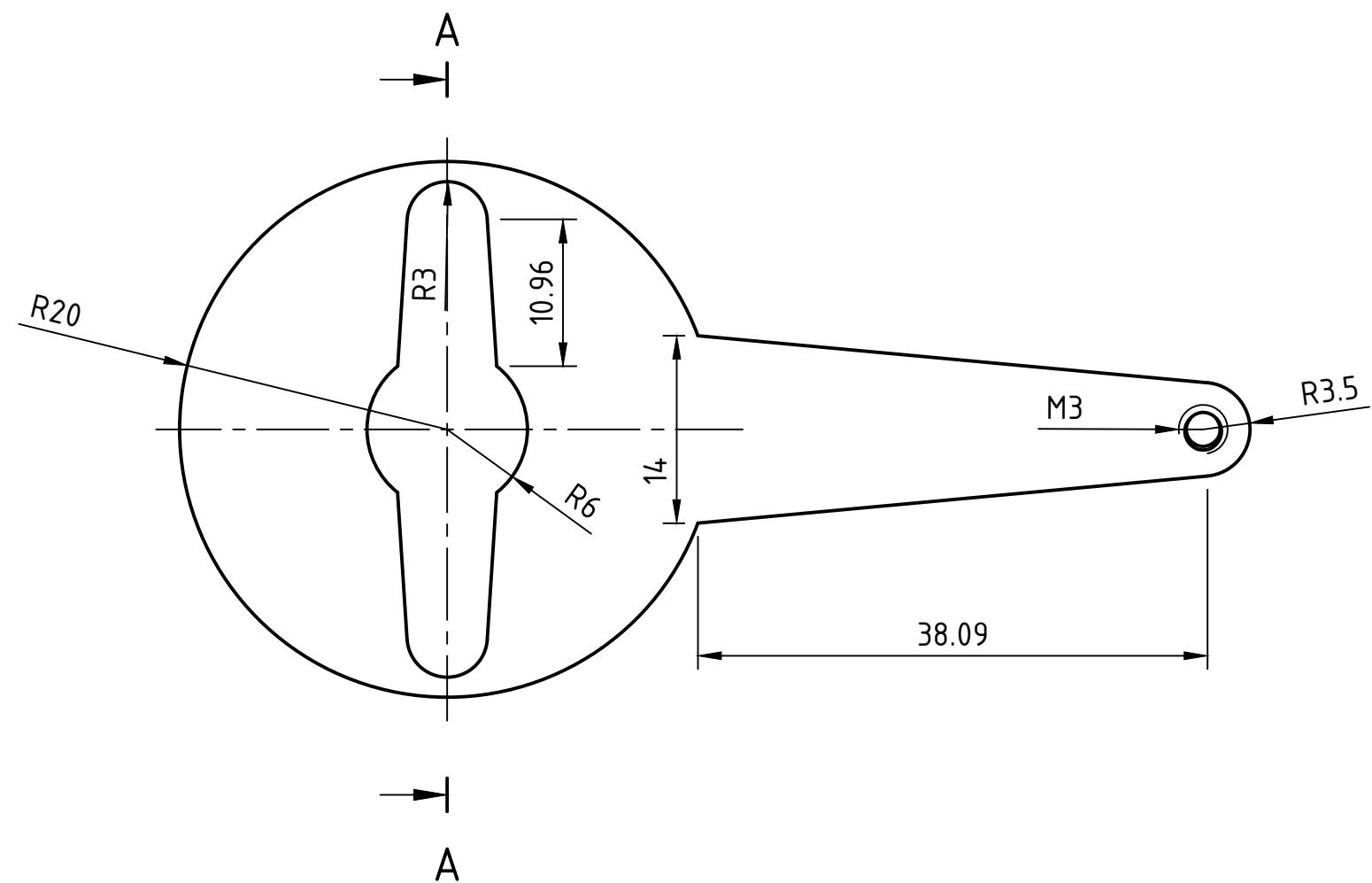
FECHA: Agosto-2021

ESCALA
1:2

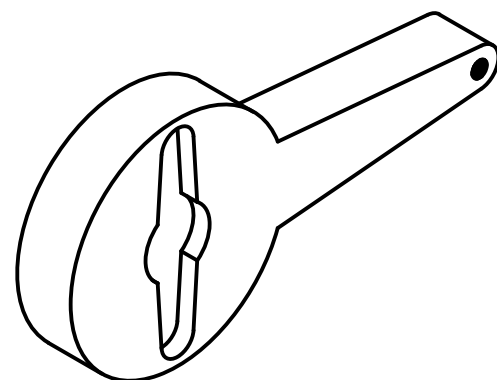
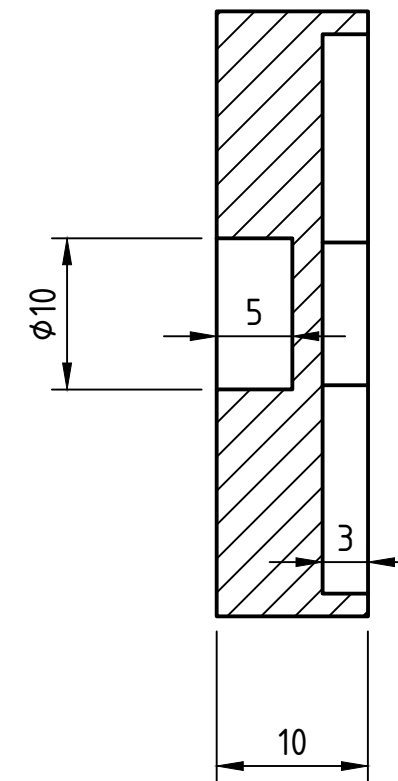
AUTOR: FERRAN PASCUAL
 GRIÑÁN

PLANO:
 ESLABÓN 2 PARTE DERECHA

PLANO N°
05

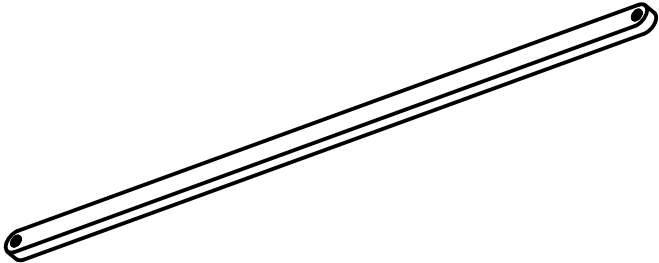
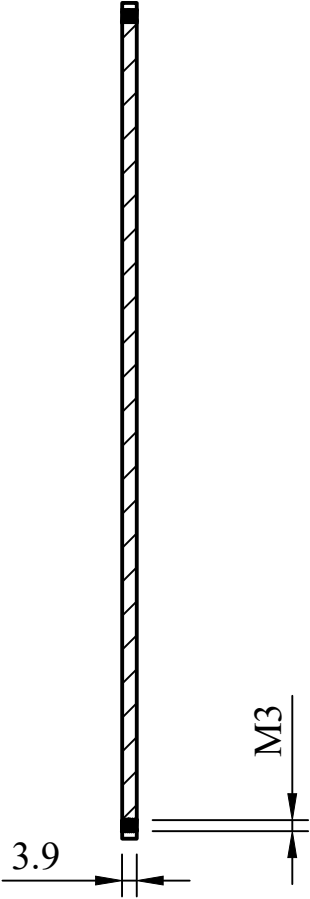
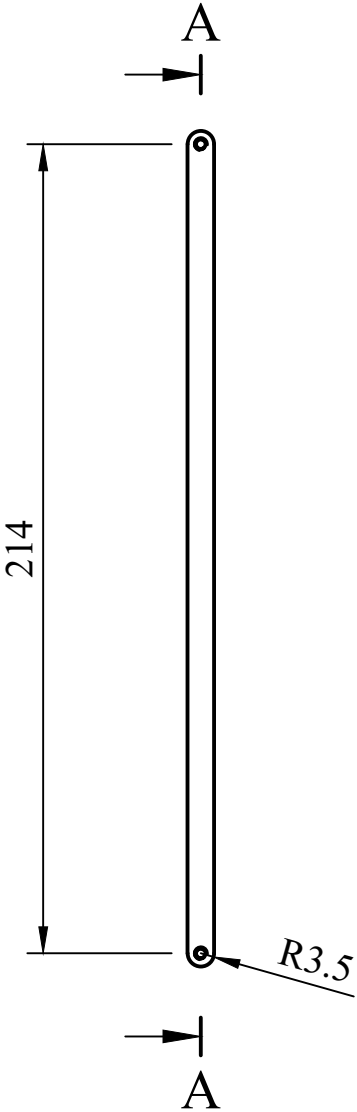


A-A (2:1)



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA REFERENCIA: 01-TFG		FECHA: Agosto-2021
AUTOR: FERRAN PASCUAL GRIÑÁN		ESCALA 2:1
PLANO: ENGANCHE		PLANO N° 06

A-A (1:2)



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO

TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA

REFERENCIA: 01-TFG

FECHA: Agosto-2021

ESCALA

1:2

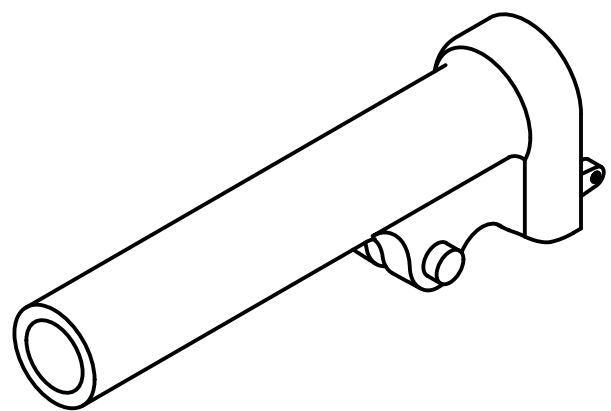
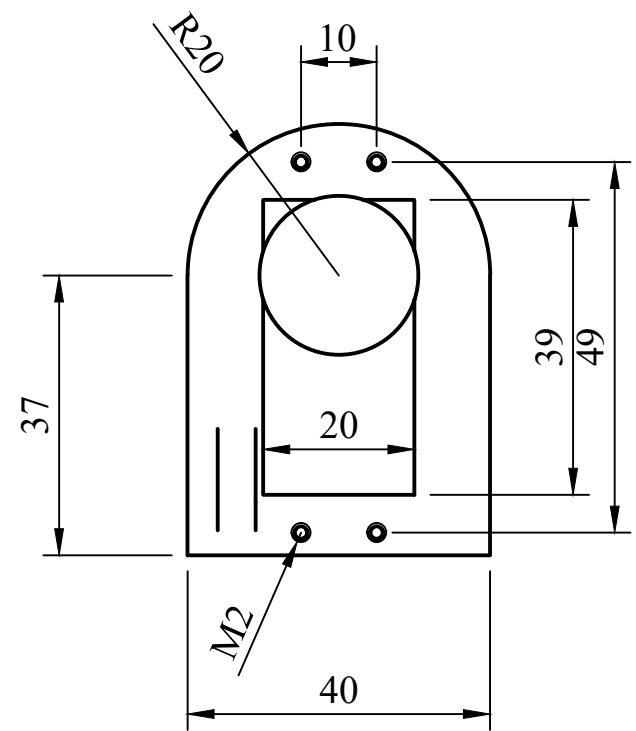
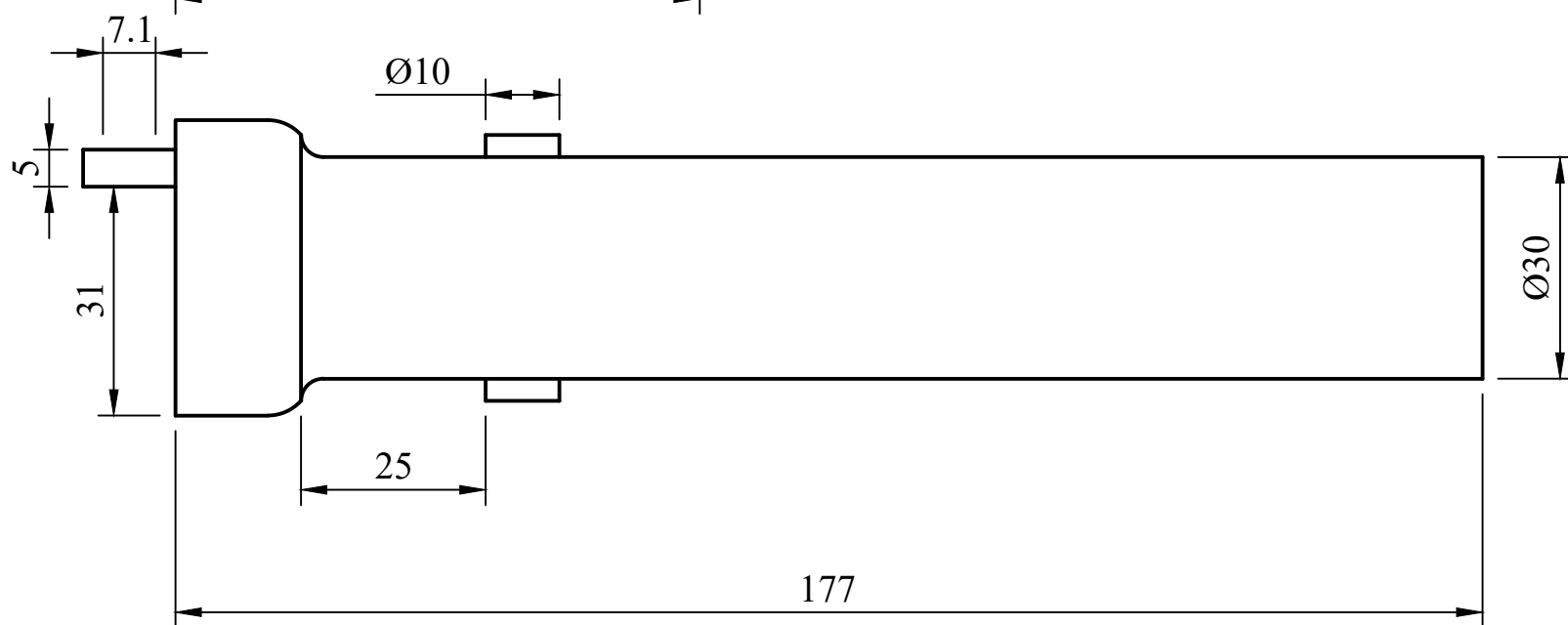
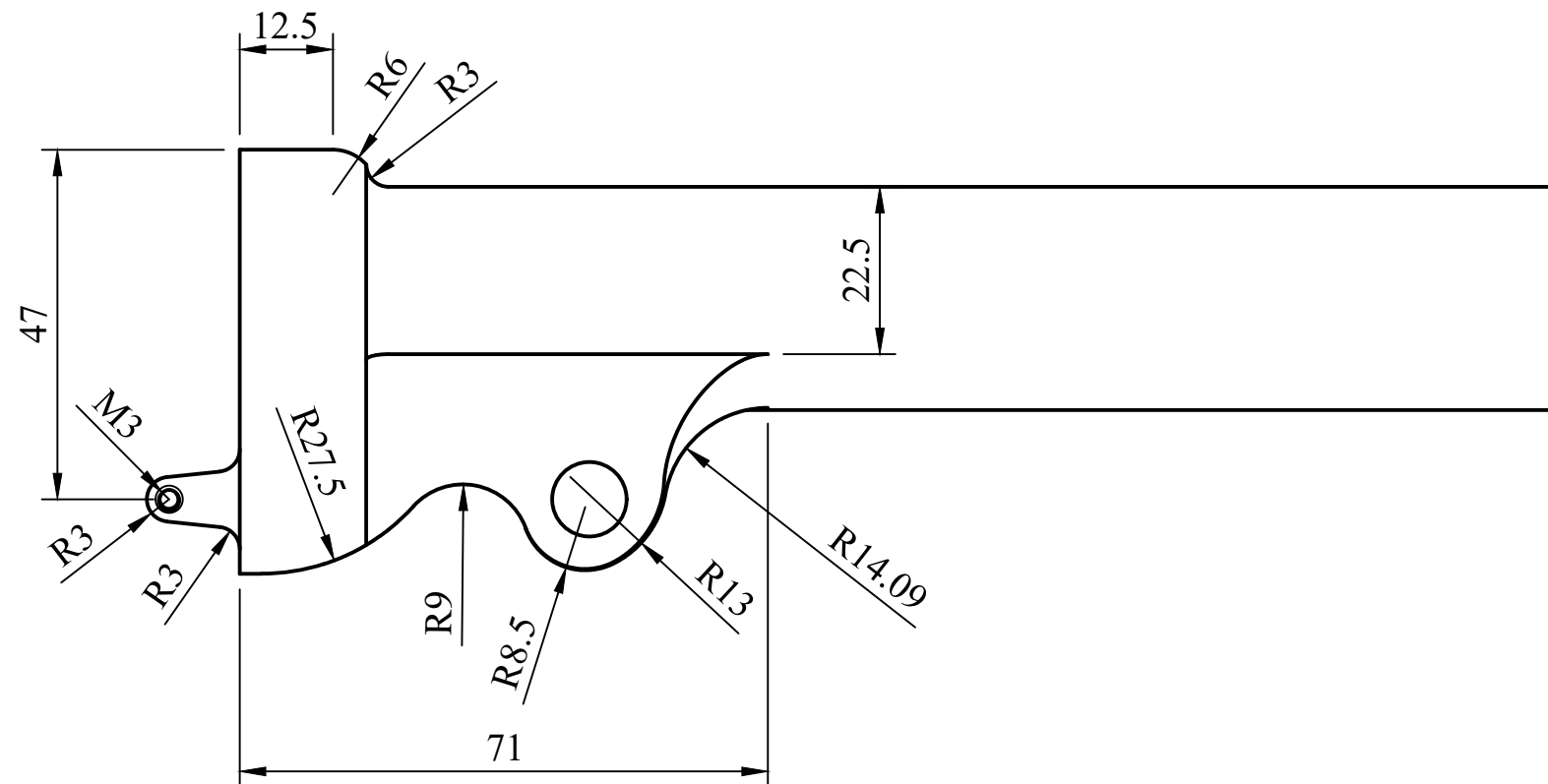
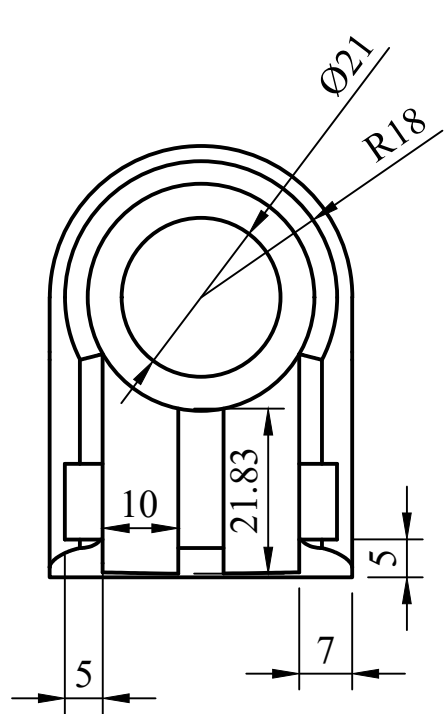
AUTOR: FERRAN PASCUAL
GRIÑÁN

PLANO:

VARILLA DE TRANSMISIÓN

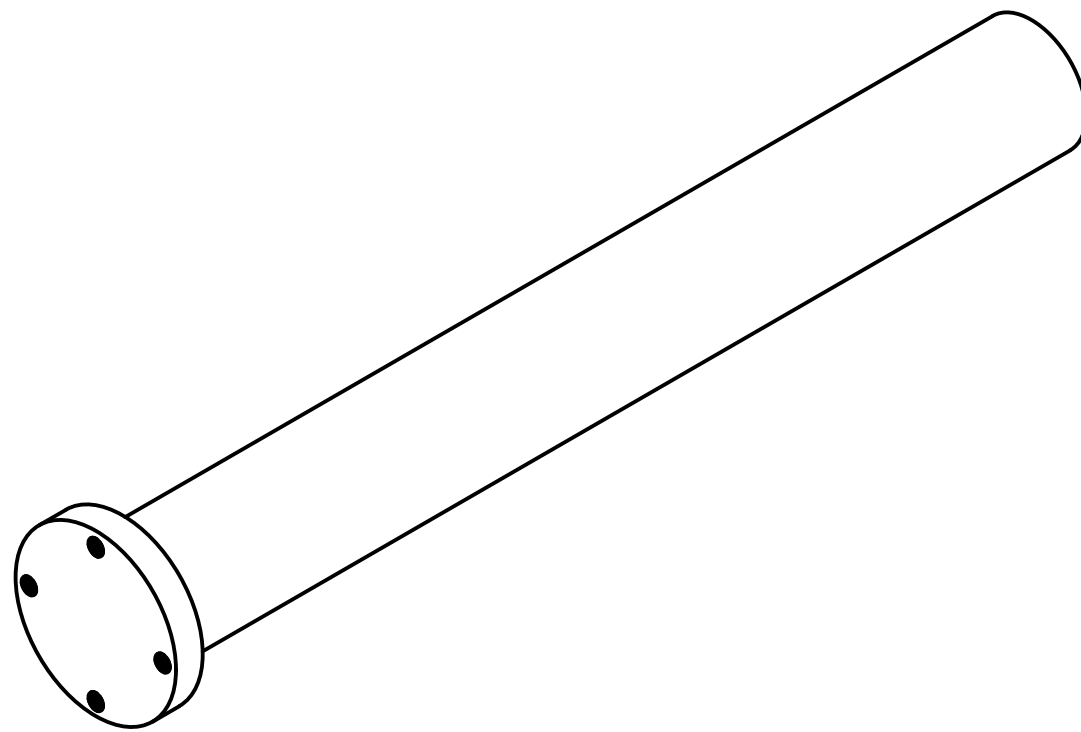
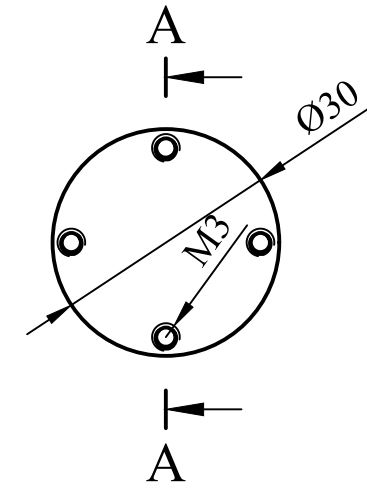
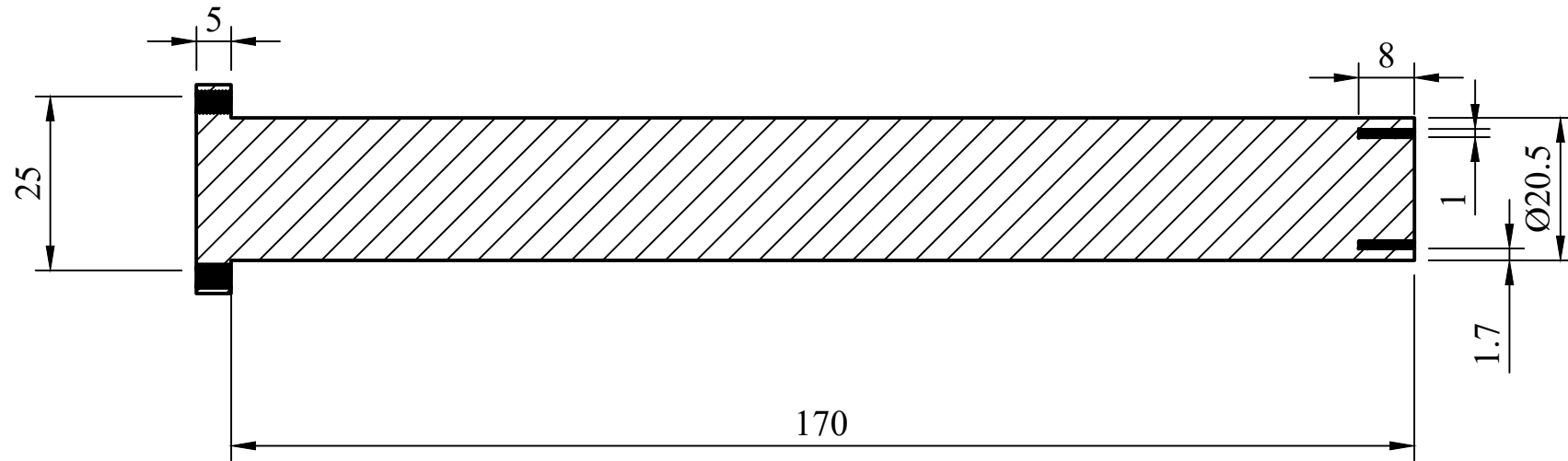
PLANO Nº

07

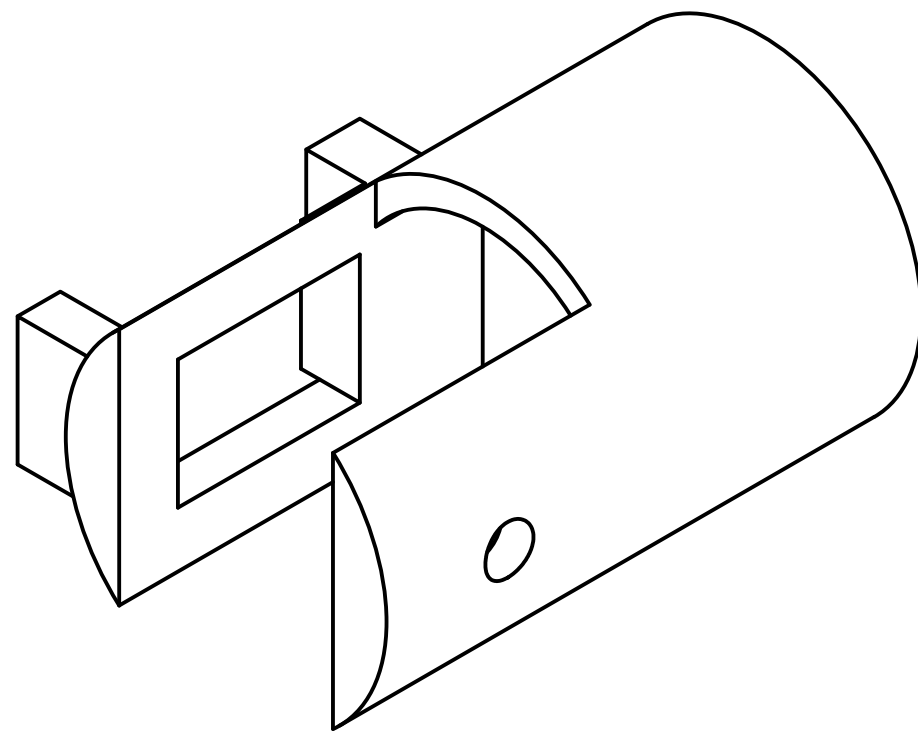
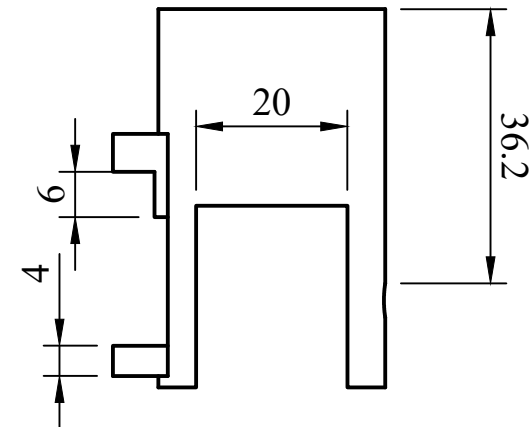
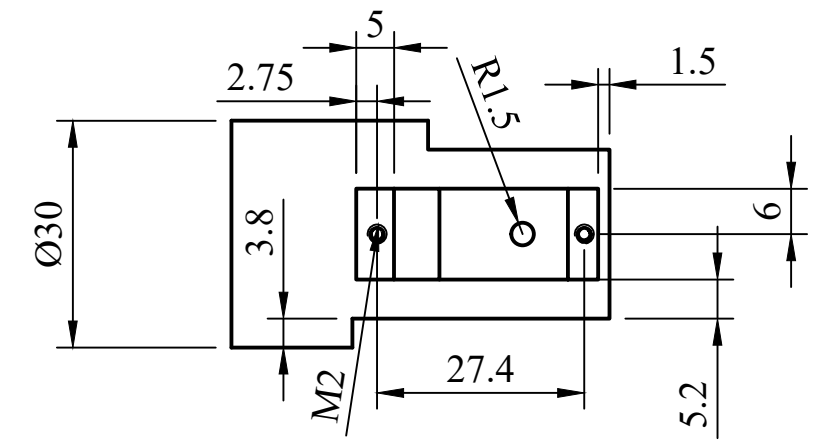
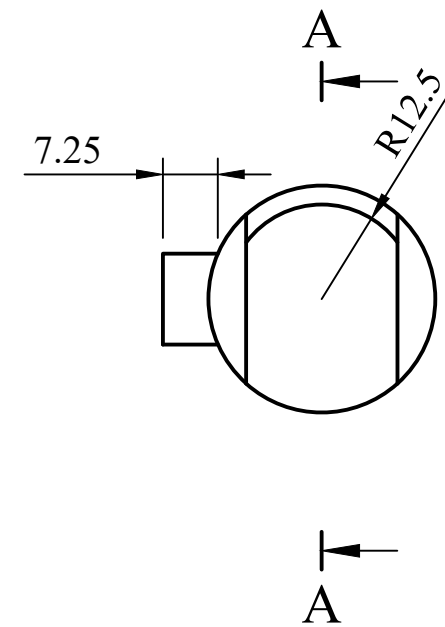
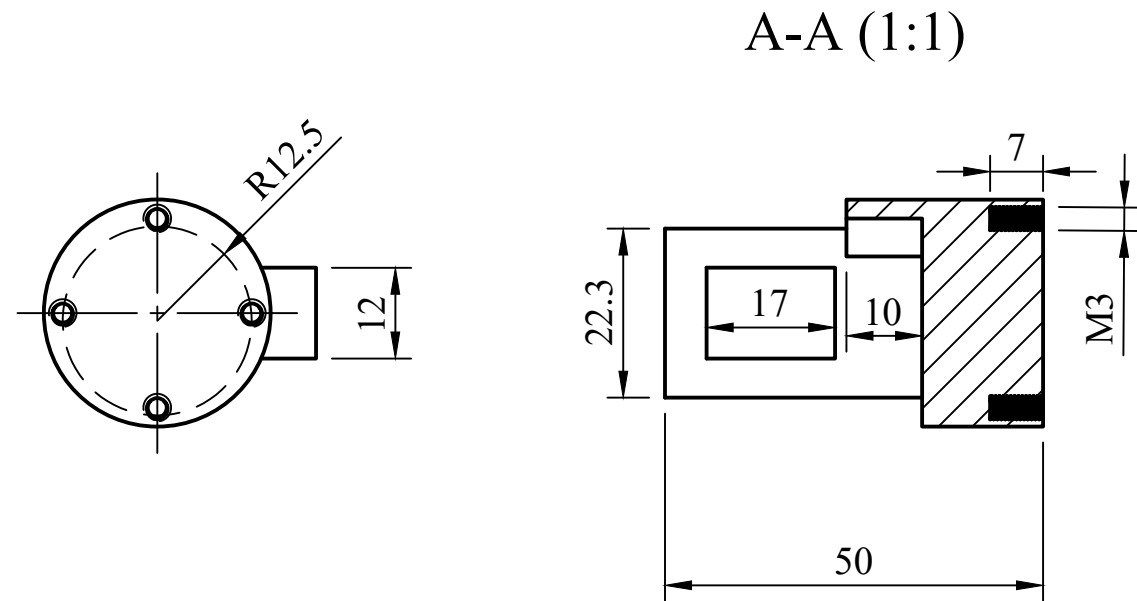


PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA REFERENCIA: 01-TFG		FECHA: Agosto-2021
AUTOR: FERRAN PASCUAL GRIÑÁN		ESCALA 1:1
PLANO: ESLABÓN 3		PLANO N° 08

A-A (1:1)

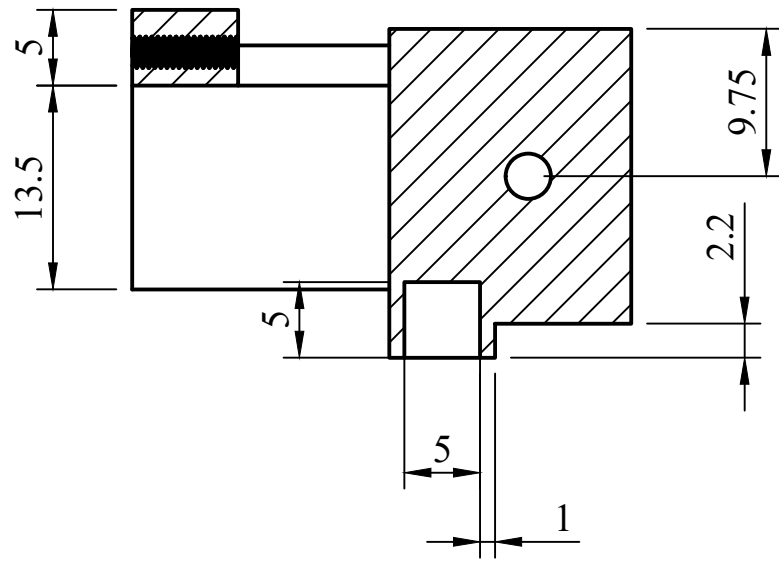


PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA REFERENCIA: 01-TFG		FECHA: Agosto-2021
		ESCALA 1:1
AUTOR: FERRAN PASCUAL GRIÑÁN	PLANO: INTERIOR ESLABÓN 3	PLANO N° 09

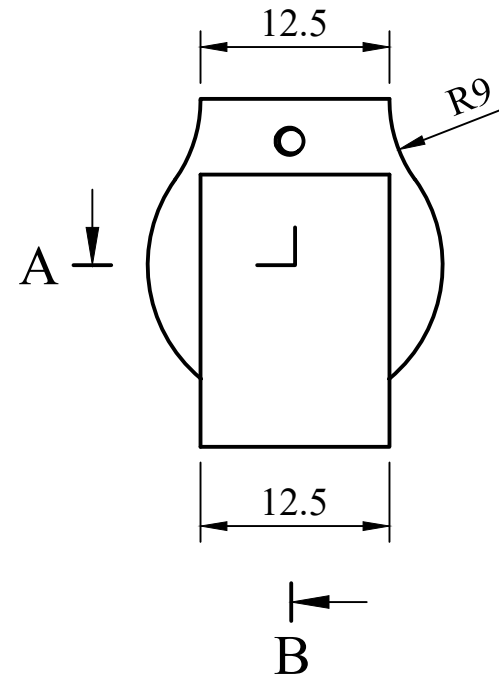


PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA REFERENCIA: 01-TFG		FECHA: Agosto-2021
AUTOR: FERRAN PASCUAL GRIÑÁN		ESCALA 1:1
PLANO: MUÑECA 1		PLANO N° 10

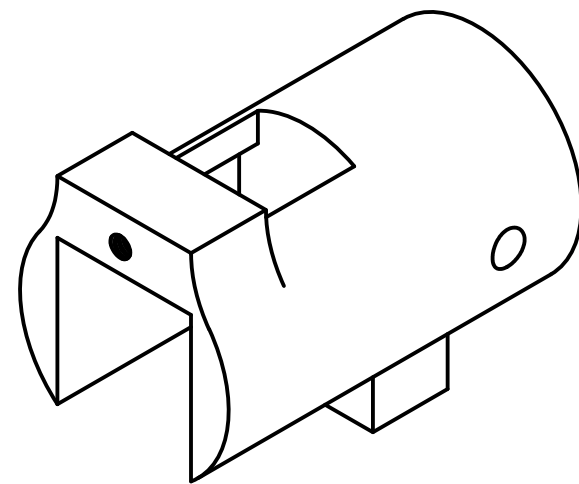
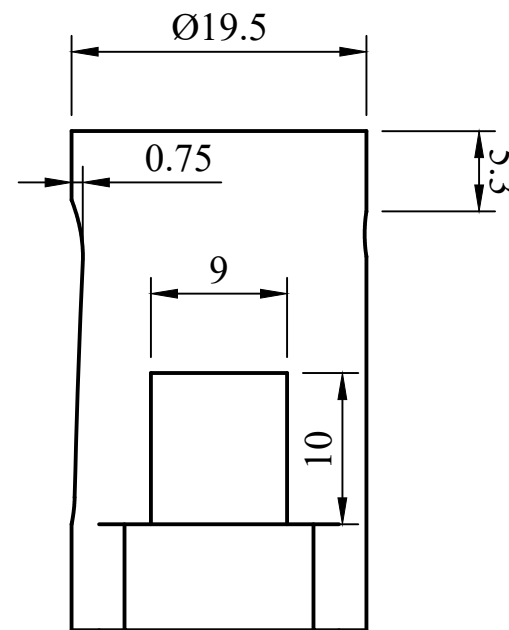
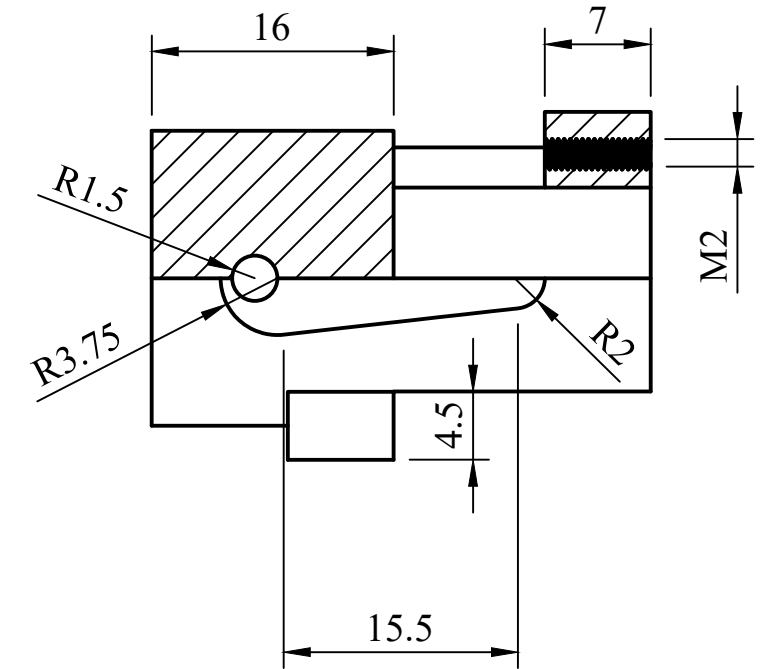
B-B (2:1)



B
A

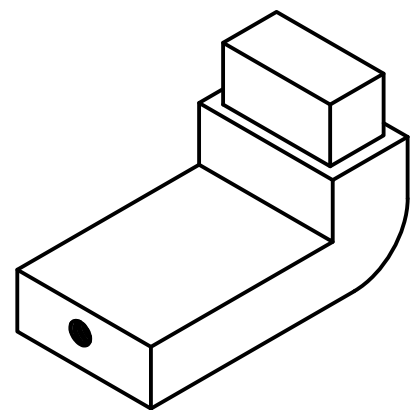
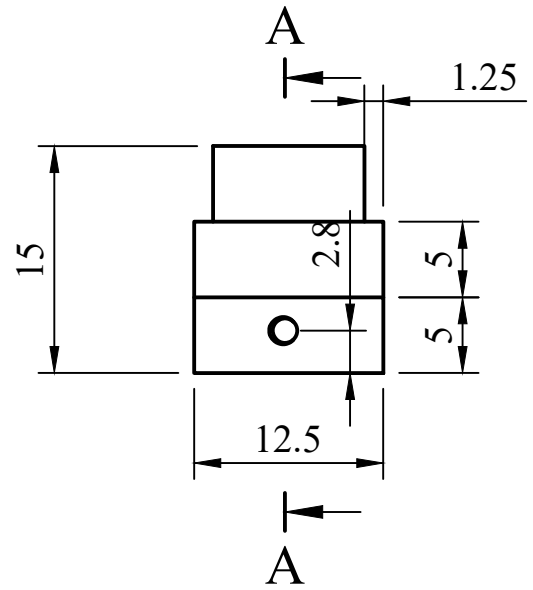
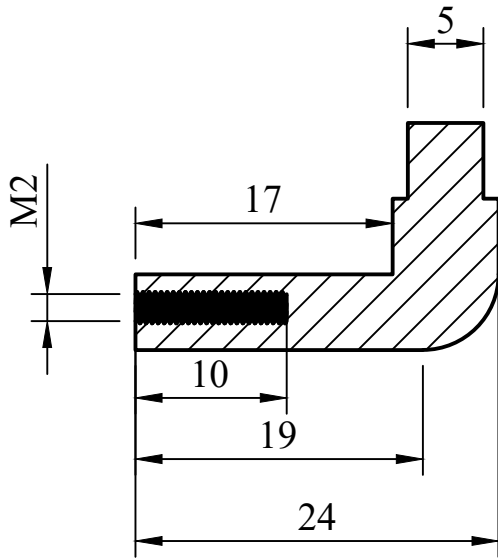


A-A (2:1)



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA REFERENCIA: 01-TFG		FECHA: Agosto-2021
AUTOR: FERRAN PASCUAL GRINÁN		ESCALA 2:1
PLANO: MUÑECA 2 PARTE 1		PLANO N° 11

A-A (2:1)



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO

TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA

REFERENCIA: 01-TFG

FECHA: Agosto-2021

ESCALA

2:1

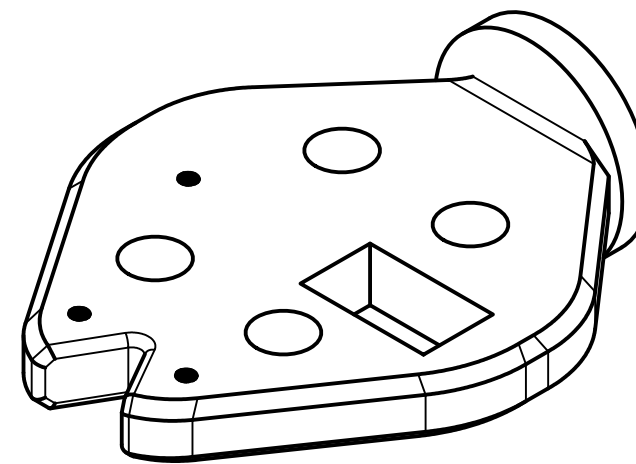
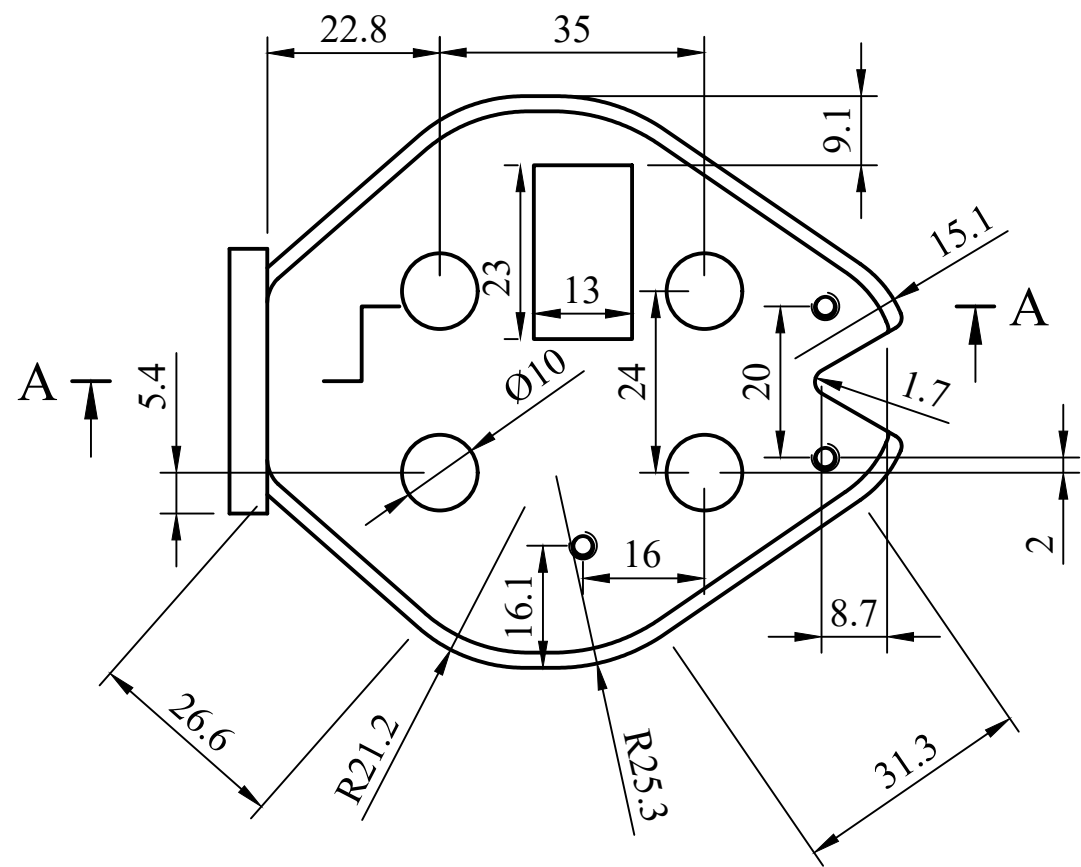
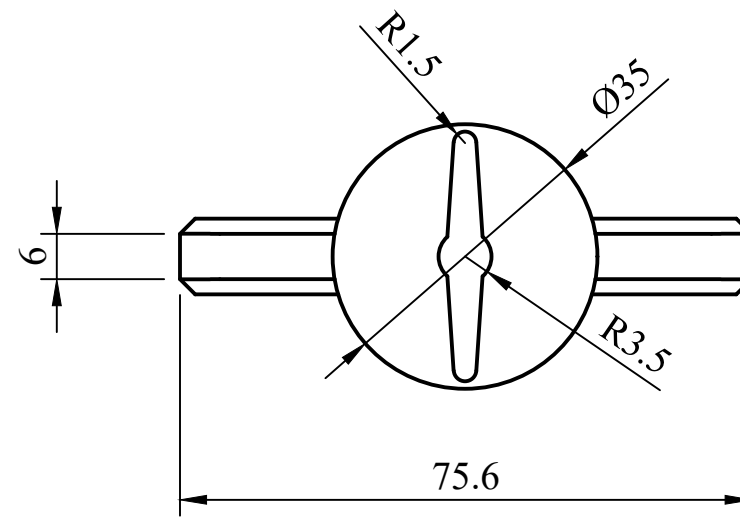
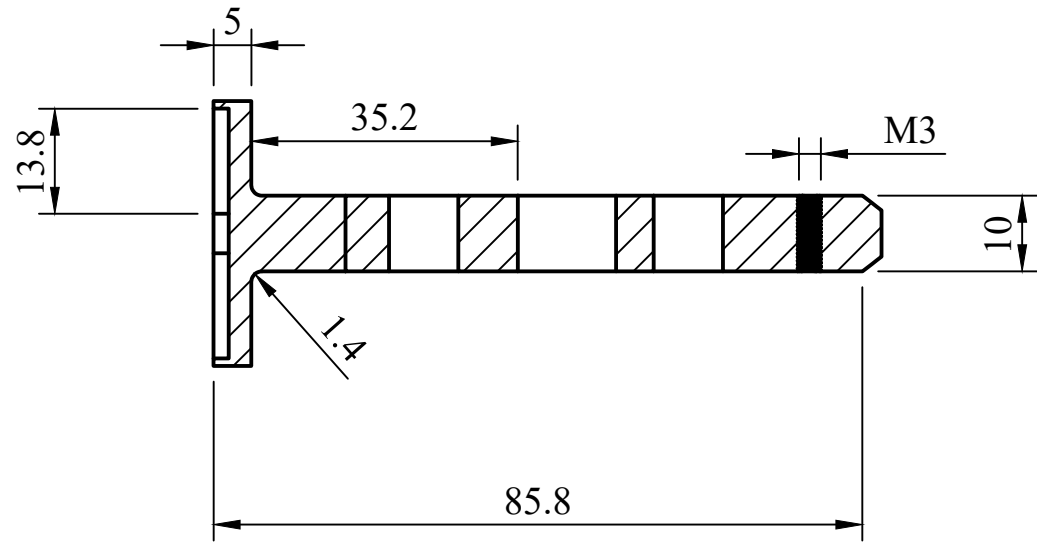
PLANO N°

12

AUTOR: FERRAN PASCUAL
GRIÑÁN

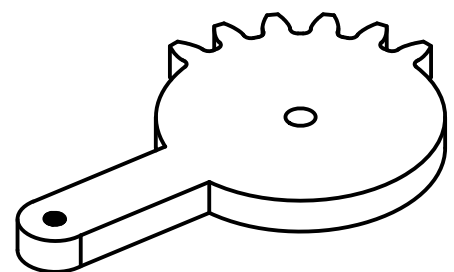
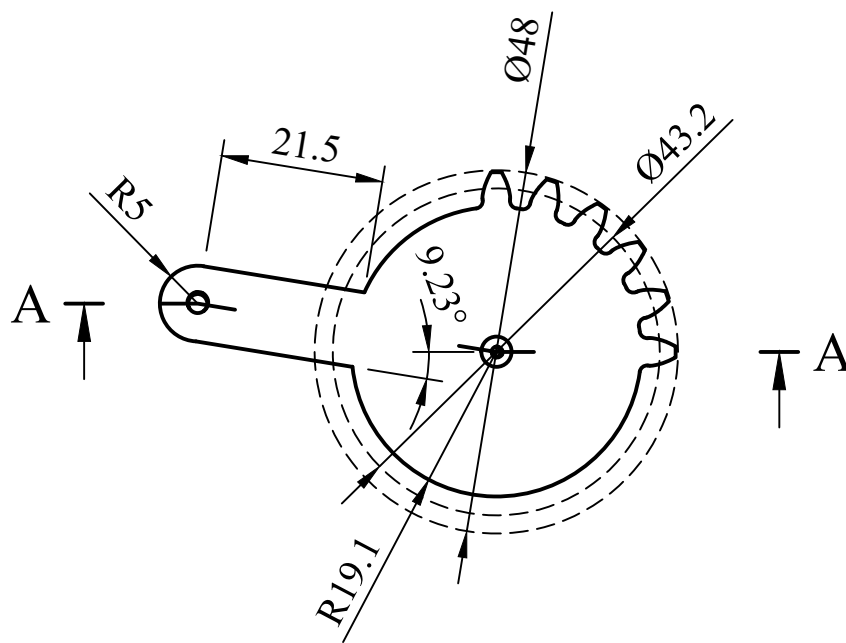
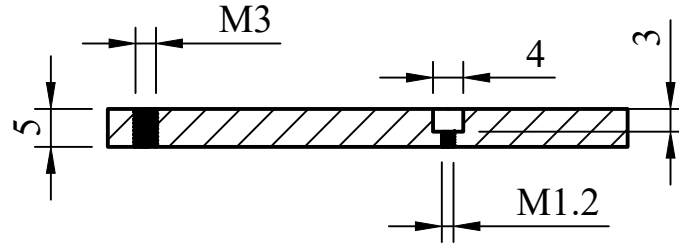
PLANO:
MUÑECA 2 PARTE 2

A-A (1:1)



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA REFERENCIA: 01-TFG		FECHA: Agosto-2021
AUTOR: FERRAN PASCUAL GRIÑÁN		ESCALA 1:1
PLANO: BASE PINZA		PLANO N° 13

A-A
(1:1)



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO

TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA

REFERENCIA: 01-TFG

FECHA: Agosto-2021

ESCALA

1:1

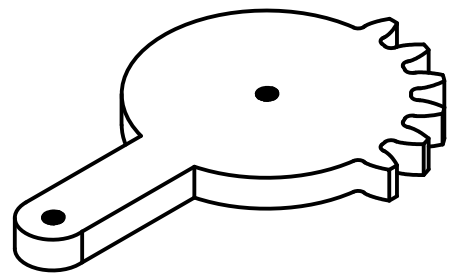
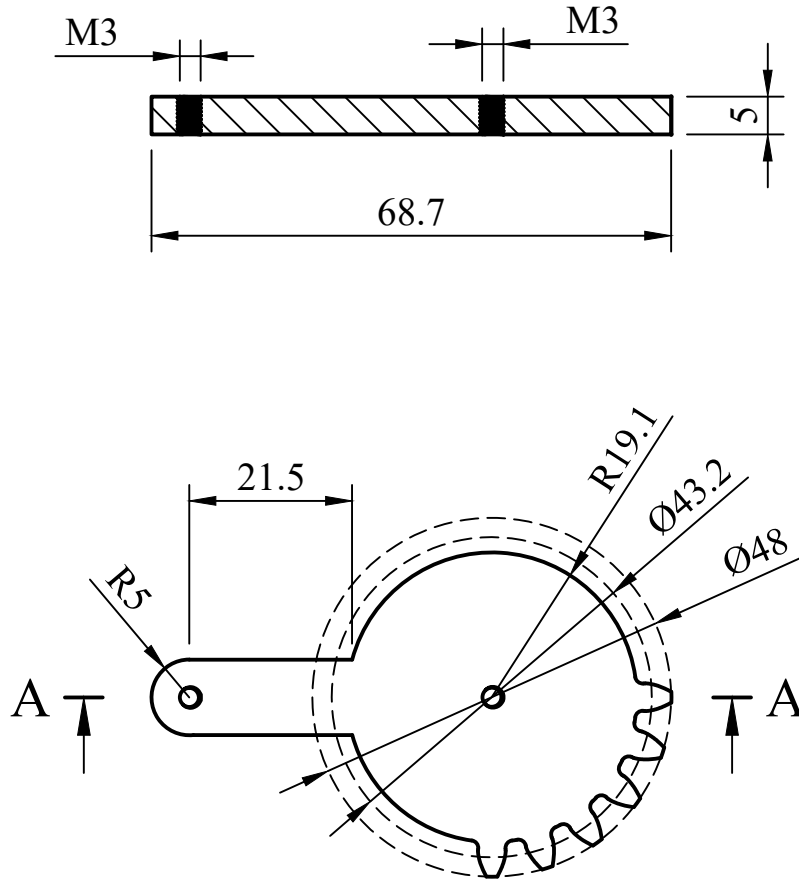
PLANO Nº

14

AUTOR: FERRAN PASCUAL
GRIÑÁN

PLANO:
ENGRANAJE 1

A-A (1:1)



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO

TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA

REFERENCIA: 01-TFG

FECHA: Agosto-2021

ESCALA

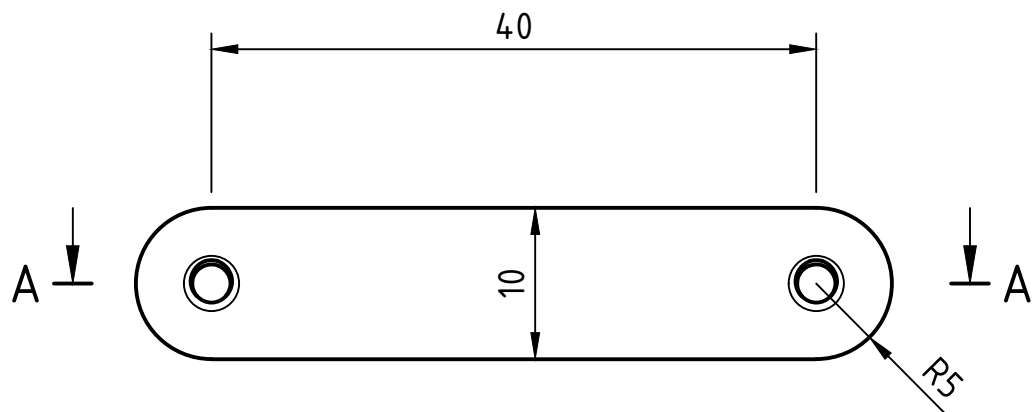
1:1

PLANO N°

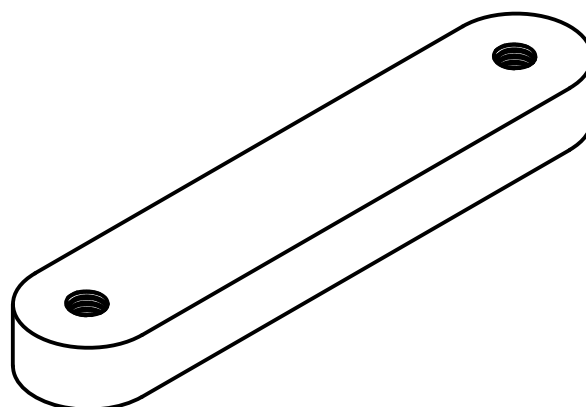
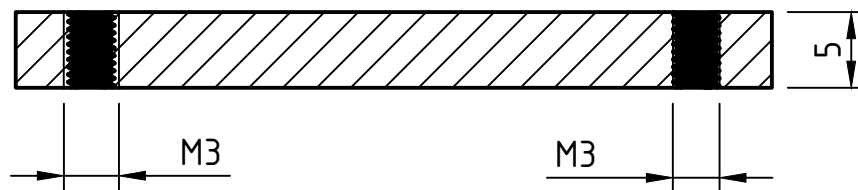
15

AUTOR: FERRAN PASCUAL
GRIÑÁN

PLANO:
ENGRANAJE 2



A-A (2:1)



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO

TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA

REFERENCIA: 01-TFG

FECHA: Agosto-2021

ESCALA

2:1

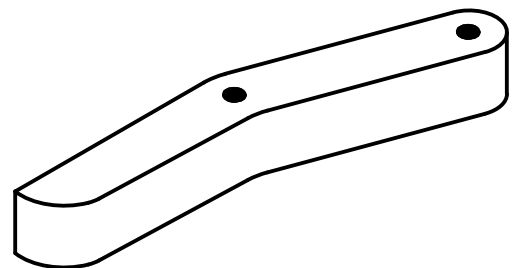
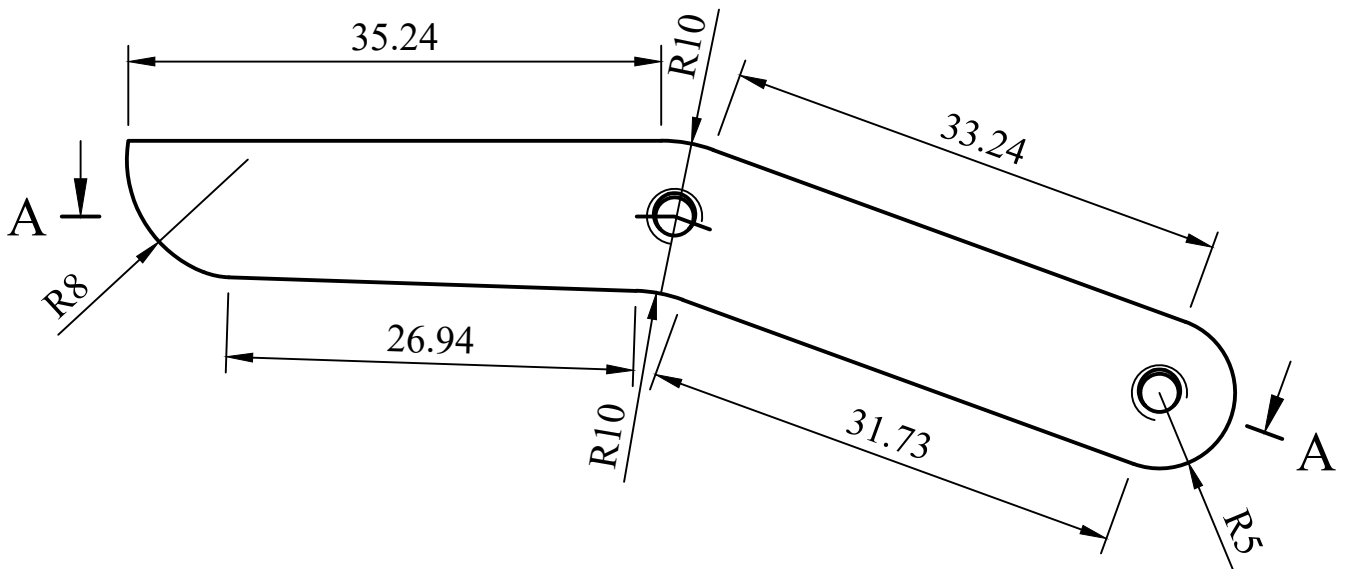
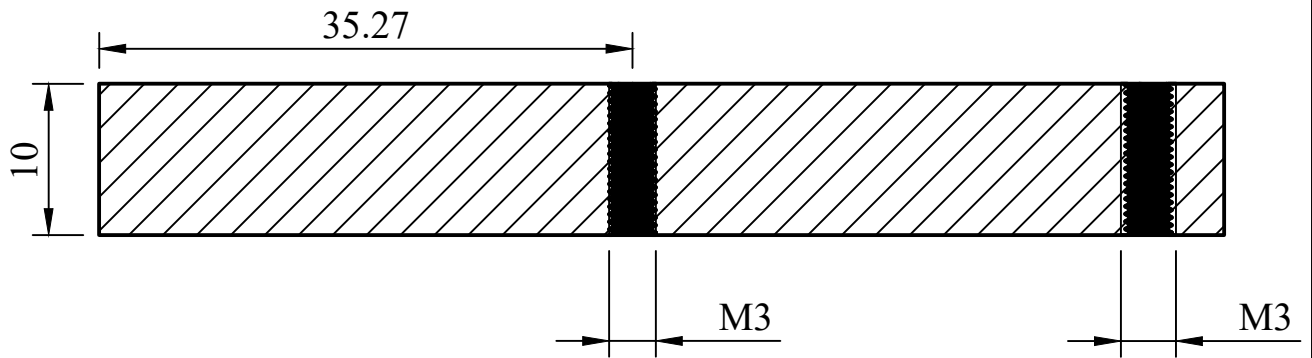
PLANO Nº

16

AUTOR: FERRAN PASCUAL
GRIÑÁN

PLANO:
BIELA

A-A (2:1)



PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACION EN IMPRESORA 3D DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL CONTROLADO MEDIANTE ARDUINO

TITULAR: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA

REFERENCIA: 01-TFG

FECHA: Agosto-2021

ESCALA

2:1

PLANO Nº

17

AUTOR: FERRAN PASCUAL
GRIÑÁN

PLANO:
PINZA

Parte III
Pliego de condiciones

Pliego de Condiciones

El objeto del presente documento es fijar las condiciones necesarias que se deben asegurar para el desarrollo de este proyecto, regulando para ello las características buscadas en los materiales de trabajo, la adecuada fabricación de las piezas propias y el correcto ensamblaje del conjunto. Además, se especificarán los ajustes y pruebas pertinentes antes de la utilización en servicio.

D.1. Condiciones de los materiales

Base

Descripción:

Soporte circular sobre el cual descansa el brazo robot, construido en plástico ABS en impresora 3D. Cuenta con unas dimensiones generales de 55 mm (alto) x Ø150 mm y un peso de 197 g. En el plano número 01 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Placa Rotación

Descripción:

Placa circular que descansa sobre la base y permite la rotación sobre el eje z del robot, construido en metacrilato. Cuenta con unas dimensiones generales de 48 mm (alto) x Ø120 mm y un peso de 142 g. En el plano número 02 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Soporte Motor 2

Descripción:

Soporte donde se atornilla el motor número 2, el cual mueve el primer eslabón del brazo, construido en metacrilato. Cuenta con unas dimensiones generales de 60 mm (alto) x 45 mm (largo) x 14 mm (ancho) y un peso de 20 g. En el plano número 03 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Soporte Motor 3

Descripción:

Soporte donde se atornilla el motor número 3, el cual mueve el segundo eslabón del brazo, construido en metacrilato. Cuenta con unas dimensiones generales de 60 mm (alto) x 45 mm (largo) x 14 mm (ancho) y un peso de 20 g. En el plano número 03 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Eslabón 2 parte izquierda

Descripción:

Primer eslabón del brazo robot, construido en plástico ABS en impresora 3D. Cuenta con unas dimensiones generales de 214 mm (alto) x 60 mm (largo) x 42 mm (ancho) y un peso de 63 g. En el plano número 04 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Eslabón 2 parte derecha

Descripción:

Primer eslabón del brazo robot, construido en plástico ABS en impresora 3D. Cuenta con unas dimensiones generales de 214 mm (alto) x 60 mm (largo) x 42 mm (ancho) y un peso de 60 g. En el plano número 05 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Enganche

Descripción:

Permite la transmisión de movimiento del motor número 2 al segundo eslabón, construido en metacrilato. Cuenta con unas dimensiones generales de 40 mm (alto) x 56,50 mm (largo) x 10 mm (ancho) y un peso de 17 g. En el plano número 06 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Varilla de transmisión

Descripción:

Permite la transmisión de movimiento de la pieza “Enganche” al segundo eslabón, construido en metacrilato. Cuenta con unas dimensiones generales de 214 mm (alto) x 7 mm (largo) x 3.88 mm (ancho) y un peso de 8 g. En el plano número 07 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Eslabón 3

Descripción:

Segundo eslabón del brazo robot, construido en plástico ABS en impresora 3D. Cuenta con unas dimensiones generales de 57 mm (alto) x 177 mm (largo) x 40 mm (ancho) y un peso de 49 g. En el plano número 08 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Interior Eslabón 3

Descripción:

Cilindro interno del eslabón 2 que permite el giro sobre sí mismo de las siguientes piezas del brazo robot, construido en plástico ABS en impresora 3D. Cuenta con unas dimensiones generales de Ø20,5 mm (alto) x 175 mm (largo) y un peso de 32 g. En el plano número 09 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Muñeca 1

Descripción:

Cilindro conectado a la pieza anteriormente descrita, construido en plástico ABS en impresora 3D. Cuenta con unas dimensiones generales de Ø30 mm (alto) x 50 mm (largo) y un peso de 16 g. En el plano número 10 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Muñeca 2 parte 1

Descripción:

Pieza que transmite movimiento y que a su vez sirve de soporte del sexto motor “SG90”, construida en plástico ABS en impresora 3D. Cuenta con unas dimensiones generales de 33 mm (alto) x 33 mm (largo) x 19,5 mm (ancho) y un peso de 12 g. En el plano número 11 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Muñeca 2 parte 2

Descripción:

Pieza que transmite movimiento y que a su vez sirve de soporte del sexto motor “SG90”, construida en plástico ABS en impresora 3D. Cuenta con unas dimensiones generales de 15 mm (alto) x 24 mm (largo) x 12,5 mm (ancho) y un peso de 4 g. En el plano número 12 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Base pinza

Descripción:

Pieza que sirve como base de las piezas que forman la pinza del brazo, construida en plástico ABS en impresora 3D. Cuenta con unas dimensiones generales de 10 mm (alto) x 88 mm (largo) x 75,6 mm (ancho) y un peso de 24 g. En el plano número 13 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Engranaje 1

Descripción:

Pieza que forma parte de la estructura de la pinza de agarre del brazo robot y que transmite movimiento mediante engranajes, construida en metacrilato. Cuenta con unas dimensiones generales de 5 mm (alto) x 65 mm (largo) x 38 mm (ancho) y un peso de 12 g. En el plano número 14 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Engranaje 2

Descripción:

Pieza que forma parte de la estructura de la pinza de agarre del brazo robot y que transmite movimiento mediante engranajes, construida en metacrilato. Cuenta con unas dimensiones generales de 5 mm (alto) x 65 mm (largo) x 38 mm (ancho) y un peso de 12 g. En el plano número 15 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Biela

Descripción:

Pieza que forma parte de la estructura de la pinza de agarre del brazo robot, construida en metacrilato. Cuenta con unas dimensiones generales de 5 mm (alto) x 50 mm (largo) x 10 mm (ancho) y un peso de 5 g. En el plano número 16 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas. Contamos con dos unidades de esta pieza.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

Pinza

Descripción:

Pieza de agarre del brazo robot, construida en metacrilato. Cuenta con unas dimensiones generales de 10 mm (alto) x 70 mm (largo) x 10 mm (ancho) y un peso de 7 g. En el plano número 17 se puede apreciar con todo detalle las dimensiones exactas. Contamos con dos unidades de esta pieza.

Control de calidad:

Todas aquellas pruebas necesarias para verificar la correctitud de la pieza a evaluar. La pieza debe tener las dimensiones, acabados superficiales y operaciones especificadas en el documento planos. Se revisará la pieza en busca de defectos que pudieran poner en riesgo el correcto funcionamiento tanto de la misma como del conjunto, sobre todo en las zonas donde se encuentren agujeros roscados.

D.2. Condiciones de la ejecución

Descripción

Se deberá tener en cuenta el proceso redactado a continuación siguiendo todas y cada una de las instrucciones para garantizar el correcto montaje del brazo robótico. El apartado **2.2. Montaje Virtual** del documento **Memoria** sirve de apoyo para este ya que se muestran las vistas explosionadas del montaje en conjunto.

En primer lugar, se dispondrá de un entorno libre y espacioso para llevar a cabo la tarea de montaje. Una vez dispuesto, se procederá a revisar si se dispone de todos los materiales necesarios para el montaje.

Se atornilla el **servomotor MG996R 1** en su correspondiente posición en la pieza **Base**. Mediante la utilización de **clavos M1** conectamos la pieza **Placa Rotación** con uno de los accesorios del servomotor MG996R, en concreto el **accesorio circular** (ilustración 65).

Conectamos las piezas **Eslabón 2 parte derecha** y **Eslabón 2 parte izquierda** en el tubo metálico que sobresale en la pieza **Placa Rotación**. Ahora podemos atornillar los **Soportes para motor 2 y 3** mediante **tornillos M3** en su correspondiente sitio de la pieza **Placa Rotación**. Conectamos los **Servomotores MG996R 2 y 3** con **tornillos autorroscantes M2** a sus correspondientes soportes. En este caso los servomotores 2 y 3 llevan unido el accesorio que aparece en la ilustración 66. Conectamos la pieza **Enganche** a **Eslabón 2 parte derecha** mediante un orificio que permite el giro entre las dos.

Una vez conectadas las piezas anteriores, unimos la pieza **Base** y la pieza **Placa Rotación** a través del servomotor y su accesorio.

Empezamos el ensamblaje de la pinza de agarre. Conectamos un **servomotor SG90 3** a la **Base Pinza** en su correspondiente posición mediante **tornillos M2**. A continuación conectamos el **Engranaje 1** al **servomotor SG90 3** mediante un **tornillo M2**. Unimos el **Engranaje 2** a la **Base Pinza** con un **tornillo M3**. Atornillamos con **M3** las dos **Bielas** a **Engranaje 1** y **Engranaje 2** respectivamente. Para finalizar la pinza de agarre atornillamos con **M3** las dos unidades de **Pinza** a las dos unidades de **Biela** respectivamente dejando las caras planas de la pieza **Pinza** enfrentadas. Formando dos mecanismos paralelogramos entre **Engranaje X**, **Biela** y **Pinza**.

Continuando a partir de la pinza de agarre conectamos el **servomotor SG90 2** a la pieza **Muñeca 2 parte 1** con un **tornillo M2** y a su vez conectamos a esta la pieza **Muñeca 2 parte 2**. El **servomotor SG90 2** cuenta con el accesorio que se muestra en la Figura X y lo conectamos a la **Base Pinza** mediante dos clavos. Se unen estos componentes a la pieza **Muñeca 1** mediante un **tornillo M3**. Se añade el **servomotor SG90 1** a la pieza **Muñeca 1** con dos **tornillos M2**. A continuación, conectamos el extremo de la pieza **Interior Eslabón 3** al ensamblaje mediante cuatro **tornillos autorroscantes M3**. Al otro extremo de la misma unimos con cuatro clavos el accesorio del **servomotor MG996R 4** que se ve en la Figura X. Pasamos **Interior Eslabón 3** a través del **Eslabón 3** y conectamos su accesorio al servomotor y este último lo atornillamos al **Eslabón 3** mediante cuatro tornillos M2.

Por último, unimos las dos partes que restan, el **Eslabón 3** y las dos subpiezas del **Eslabón 2** (**Eslabón 2 parte derecha** y **Eslabón 2 parte izquierda**) y unimos la pieza **Varilla de transmisión** por sus extremos al **Eslabón 3** y al **Enganche**.

Una vez montado el brazo robótico, se procederá a anclar la base del mismo a una tabla mediante ocho **tornillos M4** para asegurar su estabilidad. Se realizarán todas las conexiones de cableado pertinentes tal y como se indica en el apartado **5.1. Montaje del circuito electrónico** del documento **Memoria**.



Ilustración 65. Accesorio circular servomotor MG996R



Ilustración 66. Accesorio aspa servomotor MG996R

Control de calidad

Comprobar in situ que se han realizado correctamente todas las uniones entre piezas, inspeccionar si durante el proceso de montaje se hubiera producido algún daño en cualquiera de las piezas y comprobar la correcta conexión del cableado.

D.3. Pruebas de servicio

Una vez finalizado el montaje del brazo robot, se procederá a revisar con los criterios que expondremos a continuación el mismo antes de ponerlo en funcionamiento. De esta forma comprobaremos que el brazo se encuentra en las condiciones óptimas de servicio y es seguro hacerlo funcionar.

- 1.- Comprobar el anclaje a la balda de madera que servirá como suelo.
- 2.- Comprobar la tornillería y todas las conexiones entre piezas.
- 3.- Comprobar el cableado eléctrico tanto de los motores como de la placa Arduino y la fuente de tensión.
- 4.- Comprobar que no estorbe ningún objeto en el rango de movimiento del brazo.
- 5.- Comprobar uno a uno el correcto funcionamiento de los siete servomotores. Se ejecutará el primer programa mencionado en la memoria.

Especificaciones técnicas de los motores empleados. Servomotor SG90 y MG996R.

	Dimensiones (mm)	Peso (g)	Torque (kg/cm)	Alimentación (V)
SG90	22,2 (alto) x 31 (largo) x 11,8 (ancho)	9	1.8	5

MG996R	40 (alto) x 43 (largo) x 19 (ancho)	55	11	4.8 - 7
--------	--	----	----	---------

Tabla 9. Especificaciones técnicas servomotores

Parte IV
Presupuesto

Presupuesto

En el siguiente apartado se detalla el presupuesto necesario para llevar a cabo el proyecto mostrado a lo largo de este documento: Diseño y fabricación en impresora 3D de un brazo robótico de 6 GDL controlado mediante Arduino.

E.1. Coste de recursos humanos

Para el cálculo de los costes de personal se han tenido en cuenta dos factores, la carga de trabajo establecida para el TFG de 12 créditos (300 h) y el coste por hora de un Ingeniero Junior y un técnico de taller (20 €/h).

Personal	Tarea	Tiempo dedicado (h)	Coste (€)
Ingeniero Junior	Documentación	30	600
	Modelado de las piezas	50	1000
	Validación modelo cinemático	30	600
	Montaje	15	300
	Programación y control	35	700
	Simulación	30	600
	Redacción de la memoria	110	2200
Técnico de taller	Impresión piezas en 3D	20	400
Total		300 h	6400 €

Tabla 10. Coste recursos humanos

E.2. Coste de materiales

Costes de los materiales de fabricación externa que se han empleado en el proyecto.

Material	Coste Unitario			Coste total (€)
	sin IVA (€)	Unidades	IVA (€)	
Servomotor SG90	2.57	3	0.68	9.79
Servomotor MG996R	3.74	4	0.99	18.99

Tornillo M3	0.047	12	0.0126	0.72
Tornillo autorroscante M3	0.019	4	0.00525	0.10
Clavos M2	0.019	8	0.005	0.20
Tornillo autorroscante M4	0.027	8	0.00735	0.28
Placa Eleego Uno R3	7.89	1	2.09	9.99
Total				40.07 €

Tabla 11. Costes materiales

E.3. Coste de Software

Coste de los programas utilizados durante el proyecto.

Software	Coste anual (€)	Versión	Coste total (€)
Fusion 360	503	Estudiante	0
MATLAB	800	Estudiante	0
Arduino IDE	0	Gratuita	0
RobotScene	0	Gratuita	0
TinkerCAD	0	Gratuita	0
Total			0 €

Tabla 12. Costes software

Dado que se contaban con las versiones de estudiante de los programas anteriores el ahorro en cuanto a coste ha sido importante.

E.4. Coste de Hardware

Costes de los componentes utilizados para realizar el proyecto.

Componente	Coste (€)	Amortización anual	Amortización 3 meses
Ordenador sobremesa	849	121.28 €/7años	30.32 €
Monitor Asus	129	18.4 €/7años	4.6 €
Teclado Razer Blackwidow	129.99	25.99 €/5años	6.49 €
Ratón Logitech G203	27.92	5.58 €/5años	1.39 €
Tarjeta gráfica GeForce 1060	160	22.85 €/7años	5.7 €
Total			48.5 €

Tabla 13. Costes hardware

E.5. Coste de fabricación en taller

Costes de fabricación de las piezas diseñadas.

	Coste	Coste sin IVA	Coste total (€)
Material Impresión 3D ABS	28 €/Kg	12.80 €	15.48
Material metacrilato	15.80 €/Kg	4.03 €	4.87
Maquinaria	0,21085 €/kWh	8.43 €	10.2
		Total	430.55 €

Tabla 14. Costes fabricación taller

E.6. Coste total

Suma total del coste del proyecto.

	Coste
Recursos humanos	6400 €
Materiales	40.07 €
Software	0 €
Hardware	48.5 €
Fabricación en taller	430.55 €
Coste Total	6919.12 €

Tabla 15. Coste total