



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela politécnica superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y CONTROL DE UN ROBOT ARTICULAR DE 6 GRADOS DE LIBERTAD

Alumno: Youssef Ben Tahra

Tutor: Alejandro Sánchez García
Dpto: Ingeniería Electrónica y Automática

Mayo, 2023



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Don ALEJANDRO SÁNCHEZ GARCÍA , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado:
DISEÑO Y CONTROL DE UN ROBOT ARTICULAR DE 6 GRADOS DE LIBERTAD,
que presenta YOUSSEF BEN TAHRA, autoriza su presentación para defensa y
evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, mayo de 2023

El alumno:

YOUSSEF BENTAHRA

Los tutores:

ALEJANDRO
SÁNCHEZ GARCÍA

Índice

Anexos:	2
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Justificación del proyecto	7
1.2. Objetivos del proyecto	7
1.3. Resumen del proyecto	8
1.4. Metodología	8
2. INTRODUCCIÓN A LOS ROBOTS	11
2.1. Historia de los robots.....	11
2.2. Definición del robot industrial	12
2.3. Estructura de los robots industriales.....	12
2.4. Los principales parámetros que caracterizan los robots industriales	15
2.5. Tipos de robots industriales.....	16
2.5.1. Robot cartesiano.....	16
2.5.2. Robot Scara.....	16
2.5.3. Robot cilíndrico	17
2.5.4. Robot polar	17
2.5.5. Robot angular o antropomórfico.....	18
2.5.6. Robot paralelo	19
2.6. Tipos de motorización	19
2.6.1. Motores DC	20
2.6.2. Motores brushless	20
2.6.3. Motores paso a paso	22
2.7. Tipos de reductoras.....	24
2.7.1. Reductor por engranajes y correas	24
2.1.1. Reductor planetario	25
2.1.2. Reductor cicloidal	26
2.1.3. Reductor armónico	30
3. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ROBOT ELEGIDO A CONSTRUIR	33
3.1. Selección de componentes electrónicos.....	36
3.1.1. Driver motor paso a paso.....	36
3.1.2. Drivers motor DC	37

3.1.3.	Sensores	37
3.1.4.	Sensor de temperatura:	38
3.1.5.	Microcontrolador:	39
3.1.6.	Pantalla táctil	40
3.1.7.	Fuente alimentación	41
3.1.8.	Reguladores de voltaje	42
3.1.9.	Otros componentes	43
4.	DISEÑO DE REDUCTORAS DE PROTOTIPO	45
5.	DISEÑO DEL BRAZO ROBÓTICO.....	49
5.1.	Articulación 6:.....	49
5.2.	Articulación 5.....	53
5.3.	Articulación 3 y 4:.....	57
5.4.	Articulación 2.....	63
5.5.	Articulación 1.....	72
5.6.	Base para los componentes electrónicos	76
5.7.	Diseño de la pinza.....	80
5.8.	Medidas del brazo y área de trabajo	82
6.	FABRICACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO.....	83
6.1.	Impresión de piezas en 3D.....	83
6.2.	Fresado de piezas para la base	88
7.	ELECTRÓNICA	93
7.1.	Plano electrónico.....	94
8.	PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DEL BRAZO	99
8.1.	Ejecución de movimientos manualmente.	102
8.1.	Calibración de los motores	102
8.2.	Movimiento de las articulaciones introduciendo los grados	102
8.3.	Movimiento de las articulaciones por posiciones guardados	103
8.4.	Paro de emergencia:	104
8.5.	Lectura de tarjeta RFID	104
8.6.	Solución al no bloqueo para la lectura de la temperatura.	104
8.7.	Piloto de señalización:.....	105
8.8.	Programación de la pantalla.....	105
9.	PRESUPUESTO	109
9.1.	Coste de diseño	109
9.2.	Material.....	109
9.3.	Ensamblaje	111

9.4. Programación y puesta en marcha	111
10. FUTURAS MEJORAS EN EL PROYECTO	113
11. Bibliografía	115

Anexos:

Figura 1 Estructura brazo robótico	12
Figura 2 Articulación lineal	13
Figura 3 Articulación rotacional	13
Figura 4 Punto terminal	13
Figura 5 Semejanza de un brazo manipulador con la anatomía humana	14
Figura 6 Los distintos grados de libertad de un brazo de robot.....	14
Figura 7 Robot cartesiano	16
Figura 8 Robot Scara	17
Figura 9 Robot cilíndrico.....	17
Figura 10 Robot polar.....	18
Figura 11 Robot angular.....	19
Figura 12 Robot paralelo.....	19
Figura 13 Funcionamiento motor DC.....	20
Figura 14 Partes del motor Brushless.....	21
Figura 15 Motor paso a paso y su driver	23
Figura 16 Transmisión por correa.....	24
Figura 17 Composición del reductor planetario	25
Figura 18 Vista explosionada del cicloidal	27
Figura 19 Vista del conjunto	27
Figura 20 Movimiento del disco	28
Figura 21 Cálculo de la relación de reducción	28
Figura 22 Composición del reductor armónico	30
Figura 23 Zona de engranaje	31
Figura 24 Motor 23HS32-4004S.....	34
Figura 25 Motor 23HS22-2804S.....	34
Figura 26 Motor 17HS15-1504S1.....	34
Figura 27 Motor 17HS13-0404S1.....	35
Figura 28 Motor 12GAN20-100	35
Figura 29 Driver TB6600	36
Figura 30 Driver DRV8825	36
Figura 31 Driver L298N	37
Figura 32 Sensor final de carrera de contacto	37
Figura 33 Sensor magnético A3144	38
Figura 34 Sensor DS18B20.....	38
Figura 35 Arduino Mega 2560	39
Figura 36 Pantalla Nextion NX8048K070	40
Figura 37 Fuente alimentación 24v y 400W.....	41
Figura 38 Regulador de voltaje LM2596.....	42
Figura 39 Regulador MP1584EN.....	43
Figura 40 Motor brushless 380kv	45

Figura 41 ESC BLHeli 40A	45
Figura 42 Motor 17HS19-2004S1.....	46
Figura 43 Reductor planetario con motor paso a paso directo.....	47
Figura 44 Reductor planetario con motor brushless directo.....	47
Figura 45 Reductor planetario con motor paso a paso mediante poleas dentadas	47
Figura 46 Reductor planetario con motor Brushless mediante poleas dentadas.....	48
Figura 47 Reductor cicloidal con motor Brushless directo	48
Figura 48 Parámetros reductora articulación 6	51
Figura 49 Vista explosionada articulación 6.....	53
Figura 50 Parámetros reductora articulación 5	55
Figura 51 Vista explosionada de la reductora de la articulación 5	56
Figura 52 Vista explosionada articulación 5.....	56
Figura 53 Montaje de la articulación 6 y 5	57
Figura 54 Parámetros reductora articulación 3/4	60
Figura 55 Vista explosionada de la reductora de la articulación 3/4.....	60
Figura 56 Vista explosionada de la articulación 3/4	62
Figura 57 Guía para los cables.....	62
Figura 58 Montaje de las articulaciones 6, 5 y 3/4.....	63
Figura 59 Soporte lateral de la articulación 2.....	64
Figura 60 Estructura de la articulación 2	65
Figura 61 Diseño del cicloidal.....	68
Figura 62 Vista explosionada de la reductora de la articulación 2	69
Figura 63 Tensor correa articulación 2	70
Figura 64 Vista explosionada de la articulación	71
Figura 65 Montaje de las articulaciones 6, 5, 3/4 y 2	72
Figura 66 Vista seccionada de la articulación 1.....	73
Figura 67 Diseño piezas articulación 1	74
Figura 68 Sensor magnético articulación 1.....	74
Figura 69 Ensamblaje articulación 1.....	75
Figura 70 Vista explosionada de la articulación 1	75
Figura 71 Montaje de todas las articulaciones.....	76
Figura 72 Base para los componentes electrónicos 1	77
Figura 73 Base para los componentes electrónicos 1.1.....	78
Figura 74 Base para los componentes electrónicos 1.2.....	78
Figura 75 Extremidades base para los componentes electrónicos	79
Figura 76 Ensamblaje de las articulaciones y la base	80
Figura 77 Pinza del punto terminal	81
Figura 78 Ensamblaje completo del brazo robótico	81
Figura 79 Medidas del brazo.	82
Figura 80 Grados de giro de las articulaciones.....	82
Figura 81 Impresora ENDER 3 PRO	83
Figura 82 Piezas articulación 1.....	85
Figura 83 Ensamblaje articulaciones 3/4, 5 y 6	85
Figura 84 guía flexible para los cables	86
Figura 85 Montaje de los soportes laterales de la articulación 2.....	87
Figura 86 Deformación de piezas por sobrecalentamiento	87
Figura 87 CNC 3018	88
Figura 88 Fresado de pieza en FreeCAD 1	89

Figura 89 Fresado de pieza en FreeCAD 1.1	89
Figura 90 Fresado de pieza en FreeCAD 1.2	90
Figura 91 Fresado de pieza en FreeCAD 1.3	90
Figura 92 Fresado de pieza en FreeCAD 1.4	90
Figura 93 Ejemplo de fresado de una pieza	91
Figura 94 Montaje completo de todas las piezas del brazo robótico	92
Figura 95 Plano electrónico	95
Figura 96 Circuito conexión LED a 220v	96
Figura 97 Pantalla principal del terminal.	106
Figura 98 Pantalla de desbloqueo con pin.....	106
Figura 99 Desbloqueo de la pantalla principal mediante logo	107
Figura 100 Pantalla de control.....	108
Figura 101 Vista de ajustes de los motores	108
Tabla 1 Características motor 23HS32-4004S	34
Tabla 2 Características motor 23HS22-204S	34
Tabla 3 Características motor 17HS25-1504S1	34
Tabla 4 Características motor 17HS13-0404S1	35
Tabla 5 Características motor 12GAN20-100	35
Tabla 6 Características driver TB6600	36
Tabla 7 Características driver DRV8825	36
Tabla 8 características driver L298N	37
Tabla 9 Características del Arduino Mega 2560	40
Tabla 10 Cálculo de potencia de la fuente de alimentación	41
Tabla 11 Características del regulador LM2596	42
Tabla 12 Características del regulador MP1584EN	43
Tabla 13 Características motor brushless.....	45
Tabla 14 Características motor 17HS19-2004S1.....	46
Tabla 15 Cálculo del peso de la articulación 6.....	49
Tabla 16 Cálculo de peso de la articulación 5	53
Tabla 17 Cálculo de la reductora de la articulación 5	55
Tabla 18 Cálculo de peso para la articulación 3/4	58
Tabla 19 Calculo de la reductora de la articulación 3/4.....	59
Tabla 20 Cálculo del peso de la articulación 2.....	66
Tabla 21 Cálculo de la relación de reducción de la articulación 2.....	67
Tabla 22 Tabla de conexiones a los pines del Arduino	93
Tabla 23 Resistencia en función de la longitud del cable.....	97
Tabla 24 Coste total	112

Abstract

The project consists of the design, assembly and control of a fully 3D printed industrial robotic arm including the belts. For motorization, stepper motors have been used together with gearboxes, mainly cycloidal and planetary, which have been designed to add more torque.

As a terminal point, a kind of “claws” frame clamp has been placed for handling small parts.

For its control, a touch screen has been used together with a microcontroller. The control includes the free movement of each articulation, the option to save articulation positions to later repeat them in sequence among other options, the monitoring of motor temperatures and a signal pilot.

For the communication of the arm with the outside, terminal blocks have been placed for outputs and inputs for sensors or actuators. There is also an emergency button that stops the robotic arm immediately in an emergency.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación del proyecto

El proyecto se ha hecho pensando en que podría ser una herramienta útil dentro del ámbito de docencia ya que este se parece muchísimo a un brazo industrial real con sus 6 grados de libertad siendo totalmente programable ya que se basa en un microcontrolador cuya plataforma educativa es muy intuitiva, de código abierto y de bajo coste. Con ello los alumnos pueden desarrollar conocimientos sobre la funcionalidad de los brazos robóticos, los diferentes tipos de reductoras que pueden tener y cómo funciona el mecanismo y, sobre todo, la programación ya que es un lenguaje fácil de aprender. También hay la posibilidad de conectar el microcontrolador directamente al ordenador pudiendo así controlarlo desde el programa de Matlab o ROS.

Esto abre un amplio abanico de posibilidades para desarrollar infinitas prácticas de asignaturas con relación a carreras de electrónica y mecatrónica.

1.2. Objetivos del proyecto

El objetivo principal es construir un brazo articular de seis grados de libertad impreso totalmente en 3D que permita realizar simples tareas y manipulaciones de ciertas piezas. Pero siendo el objetivo principal educativo permitiendo así desarrollar conocimientos del diseño y funcionamiento de un brazo real ya que estos se parecen bastante. Además de la libertad de poder programarlo con diversos lenguajes de programación.

Un objetivo sería que al ser un brazo impreso en 3D, cualquiera podría disponer de un brazo robótico y así adquirir los conocimientos básicos del funcionamiento de los mismos.

Además de poder experimentar con una impresora 3D para la impresión de las diferentes piezas del robot, tiene una parte en la que se usa una CNC que ofrece la oportunidad de aprender su funcionamiento ya que, según la experiencia adquirida, esta funciona diferente a una impresora 3D a la que estamos acostumbrados.

1.3. Resumen del proyecto

El proyecto consiste en el diseño, montaje y control de un brazo robótico industrial totalmente impreso en 3D incluyendo las correas. Para la motorización se ha hecho uso de motores paso a paso junto a reductoras principalmente de tipo cicloidal y planetario que se han diseñado para añadir más par.

Como punto terminal se ha puesto una especie de pinza de cuadro “garras” para la manipulación de pequeñas piezas.

Para su control se ha usado una pantalla táctil junto a un microcontrolador. El control incluye el libre movimiento de cada articulación, la opción de guardar posiciones de las articulaciones para luego repetirlas en secuencia entre otras opciones, la monitorización de temperaturas de los motores y un piloto de señalización.

Para la comunicación del brazo con el exterior, se han colocado borneros para salidas y entradas para sensores o actuadores. También hay una seta de emergencia que hace parar el brazo robótico de inmediato en caso de emergencia.

1.4. Metodología

El primer punto a tener en cuenta es la investigación y estudio de los tipos de robots y reductoras. En el mercado hay brazos de diferentes tipos, funciones, características y estructuras. La fuente de información principal han sido foros y canales de YouTube como “*Skyentific [9]*”, “*Paul Gould [19]*”, “*Damian Lickindorf [17]*” entre otros que citaré en la bibliografía. Para la elección, se ha tenido en cuenta un brazo completo que exista en la mayoría de las industrias para así tener un prototipo para docencia lo más cerca posible a la realidad.

El siguiente punto a tratar sería la elección de la motorización ya que en el mercado existen diferentes tipos y configuraciones de motores de costes variados. Para este paso también ha sido necesario elegir los sensores, la unidad de control y la alimentación. Después de tenerlo todo claro, se procederá al diseño.

Una vez terminado este paso, se pasará al software y programación. En este paso se ha tenido en cuenta varios factores como facilidad de adquirir los software de programación siendo estos de código abierto y gratuitos.

Todas estas tareas se irán comentando detalladamente más adelante con sus respectivos estudios teóricos y aclaraciones en el proceso de construcción.

2. INTRODUCCIÓN A LOS ROBOTS.

Antes de comenzar con el brazo robótico en cuestión, haremos una introducción sobre la estructura de los robots y sus tipos, sus características principales, los tipos de reductoras que pueden tener y por último la motorización.

2.1. Historia de los robots

La robótica como hoy en día la conocemos, tiene sus orígenes hace miles de años. Comenzaremos aclarando que antiguamente los robots eran conocidos con el nombre de autómatas, y la robótica no era reconocida como ciencia, es más, la palabra robot surgió hace mucho después del origen de los autómatas.

Desde el principio de los tiempos, el hombre ha deseado crear vida artificial. Se ha empeñado en dar vida a seres artificiales que realicen sus tareas repetitivas, tareas pesadas o difíciles de realizar por un ser humano. Se creaban autómatas a partir de materiales que se encontraban al alcance de todo el mundo. Utilizaban maderas resistentes, metales como el cobre y cualquier otro material moldeable.

Estos primeros autómatas utilizaban, principalmente, la fuerza bruta para poder realizar sus movimientos. A las primeras máquinas herramientas que ayudaron al hombre a facilitarle su trabajo no se les daba el nombre de autómata, sino más bien se les reconocía como artefactos o simples máquinas.

El desarrollo en la tecnología, donde se incluyen las poderosas computadoras electrónicas, los actuadores de control retroalimentados, transmisión de potencia a través de engranes, y la tecnología en sensores han contribuido a flexibilizar los mecanismos autómatas para desempeñar tareas dentro de la industria. La investigación en inteligencia artificial desarrolló maneras de emular el procesamiento de información humana con computadoras electrónicas.

Entre los escritores de robótica, Isaac Asimov contribuyó con varias narraciones relativas a robots, comenzó en 1939, a él se atribuye el acuñamiento del término Robótica. La imagen de robot que aparece en su obra es el de una máquina bien diseñada y con una seguridad garantizada que actúa de acuerdo con tres principios. Estos principios fueron denominados por Asimov las Tres Leyes de la Robótica, y son:

1. Un robot no puede actuar contra un ser humano o, mediante la inacción, que un ser humano sufra daños.

2. Un robot debe de obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, salvo que estén en conflictos con la primera ley.

3. Un robot debe proteger su propia existencia, a no ser que esté en conflicto con las dos primeras leyes.

2.2. Definición del robot industrial

Las definiciones de los robots industriales son varias según la Robotic Industry Association (RIA), la Organización Internacional de Estándares (ISO), la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR) o International Federation of Robotics (IFR).

Común en todas las diferentes definiciones, es la aceptación del robot industrial como un brazo mecánico con capacidad de manipulación y que incorpora un control más o menos complejo. Un sistema robotizado, en cambio, es un concepto más amplio. Engloba todos aquellos dispositivos que realizan tareas de forma automática en sustitución de un ser humano y que pueden incorporar o no a uno o varios robots, siendo esto último lo más frecuente.

2.3. Estructura de los robots industriales

Un manipulador robótico consta de una secuencia de elementos estructurales rígidos, denominados enlaces o eslabones, conectados entre sí mediante juntas o articulaciones, que permiten el movimiento relativo de cada dos eslabones consecutivos. En la Figura 1 se puede observar.

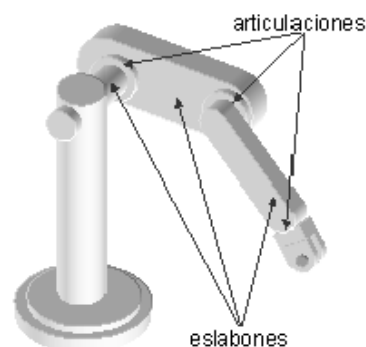


Figura 1 Estructura brazo robótico

Una articulación puede ser:

- **Lineal** (deslizante, traslacional o prismática), si un eslabón desliza sobre un eje solidario al eslabón anterior. (Figura 2)
- **Rotacional**, en caso de que un eslabón gire en torno a un eje solidario al eslabón anterior. (Figura 3)

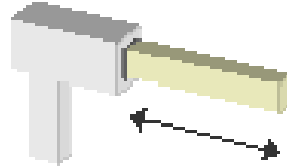


Figura 2 Articulación lineal

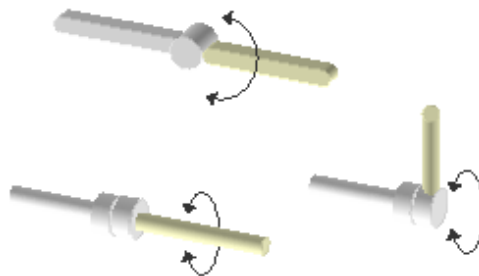


Figura 3 Articulación rotacional

El conjunto de eslabones y articulaciones se denomina **cadena cinemática**. Se dice que una cadena cinemática es abierta si cada eslabón se conecta mediante articulaciones exclusivamente al anterior y al siguiente, exceptuando el primero, que se suele fijar a un soporte, y el último, cuyo extremo final queda libre. A éste se puede conectar un **elemento terminal** o **actuador final**: una herramienta especial que permite al robot de uso general realizar una aplicación particular, una herramienta de sujeción, de soldadura, de pintura, etc. El punto más significativo del elemento terminal se denomina **punto terminal** pudiendo ser una pinza o una herramienta tal y como se observa en la Figura 4.

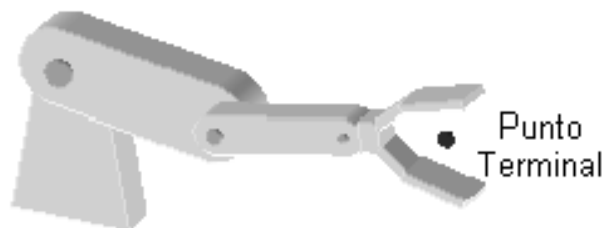


Figura 4 Punto terminal

En la Figura 5 se observa a los manipuladores robóticos se les suele denominar también brazos de robot por la analogía que se puede establecer, en muchos casos, con las extremidades superiores del cuerpo humano.

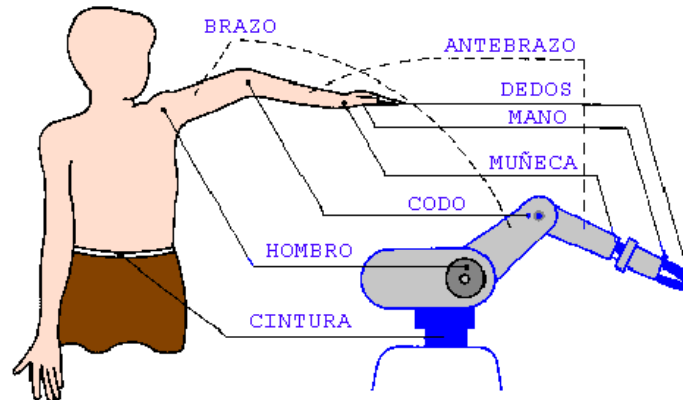


Figura 5 Semejanza de un brazo manipulador con la anatomía humana

Se denomina **grado de libertad (g.d.l.)** a cada una de las coordenadas independientes que son necesarias para describir el estado del sistema mecánico del robot (posición y orientación en el espacio de sus elementos). Normalmente, en cadenas cinemáticas abiertas, cada par eslabón-articulación tiene un solo grado de libertad, ya sea de rotación o de traslación. Pero una articulación podría tener dos o más g.d.l. que operan sobre ejes que se cortan entre sí. En la Figura 6 se observa un ejemplo de un brazo de 6 grados de libertad.



Figura 6 Los distintos grados de libertad de un brazo de robot

Para describir y controlar el estado de un brazo de robot es preciso determinar:

- La posición del punto terminal (o de cualquier otro punto) respecto de un sistema de coordenadas externo y fijo, denominado el sistema mundo.

- El movimiento del brazo cuando los elementos actuadores aplican sus fuerzas y momentos.

El análisis desde el punto de vista mecánico de un robot se puede efectuar atendiendo exclusivamente a sus movimientos (estudio cinemático) o atendiendo además a las fuerzas y momentos que actúan sobre sus partes (estudio dinámico) debidas a los elementos actuadores y a la carga transportada por el elemento terminal.

2.4. Los principales parámetros que caracterizan los robots industriales

Número de **grados de libertad**. Es el número total de grados de libertad de un robot, dado por la suma de g.d.l. de las articulaciones que lo componen. Aunque la mayoría de las aplicaciones industriales requieren 6 g.d.l., como las de soldadura, mecanizado y almacenamiento, otras más complejas requieren un número mayor, tal es el caso de las labores de montaje.

Espacio de accesibilidad o espacio (volumen) de trabajo. Es el conjunto de puntos del espacio accesibles al punto terminal, que depende de la configuración geométrica del manipulador. Un punto del espacio se dice totalmente accesible si el punto terminal puede situarse en él en todas las orientaciones que permita la constitución del manipulador y se dice parcialmente accesible si es accesible por el punto terminal pero no en todas las orientaciones posibles.

Capacidad de posicionamiento del punto terminal. Se concreta en tres magnitudes fundamentales: resolución espacial, precisión y repetibilidad, que miden el grado de exactitud en la realización de los movimientos de un manipulador al realizar una tarea programada.

Capacidad de carga. Es el peso que puede transportar el elemento terminal del manipulador. Es una de las características que más se tienen en cuenta en la selección de un robot dependiendo de la tarea a la que se destine.

Velocidad. Es la máxima velocidad que alcanzan el punto terminal y las articulaciones.

Mas adelante se irán viendo estas características en el brazo que se diseñará.

2.5. Tipos de robots industriales

2.5.1. Robot cartesiano

Una aplicación muy extendida para este tipo de robots es la máquina de control numérico (CN). Las aplicaciones más sencillas son las usadas en las máquinas de fresado o dibujo, donde un taladro o una pluma se traslada a lo largo de un plano X-Y mientras la herramienta sube y baja (eje Z) sobre la superficie para crear un preciso diseño. En la Figura 7 se observa un ejemplo que puede ser las CNCs o las impresoras 3D.

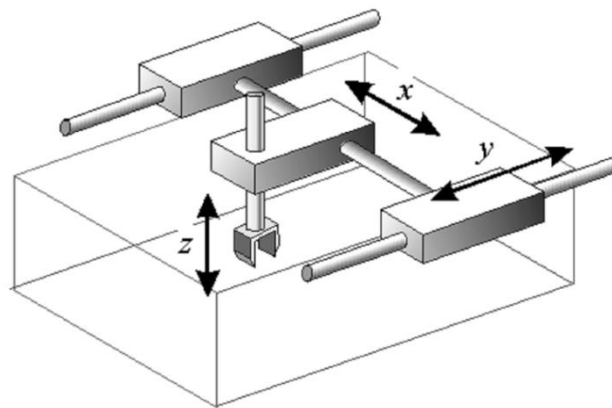


Figura 7 Robot cartesiano

2.5.2. Robot Scara

Un SCARA (acrónimo que responde por sus siglas en inglés a Selective Compliant Assembly Robot Arm o Selective Compliant Articulated Robot Arm) es un robot de cuatro grados de libertad con posicionamiento horizontal. Los Robots SCARA se conocen por sus rápidos ciclos de trabajo, excelente repetitividad, gran capacidad de carga y su amplio campo de aplicación. En la Figura 8 se observa un ejemplo que pueden ser los robots de PICK AND PLACE.

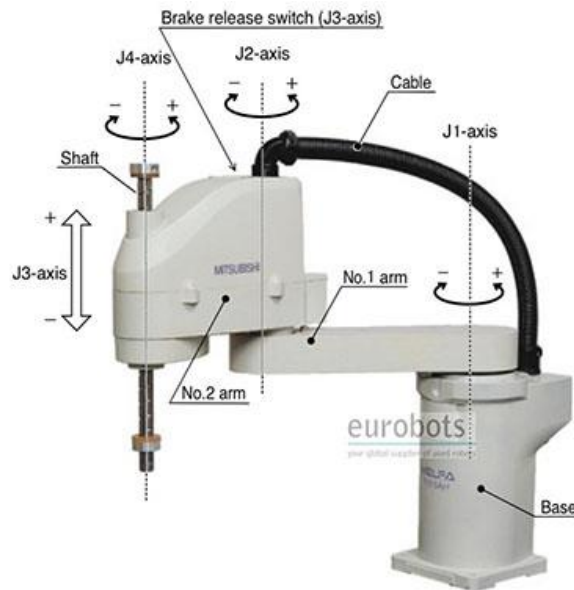


Figura 8 Robot Scara

2.5.3. Robot cilíndrico

Es un robot cuyos ejes forman un sistema de coordenadas cilíndricas. Tiene una articulación rotacional sobre una base y articulaciones lineales para el movimiento en altura y en radio.

Es usado en las industrias para operaciones de ensamblaje, manipulación de máquinas herramientas, soldadura por punto, y manipulación en máquinas de fundición a presión. En la Figura 9 se puede observar el espacio de trabajo que estos tienen.

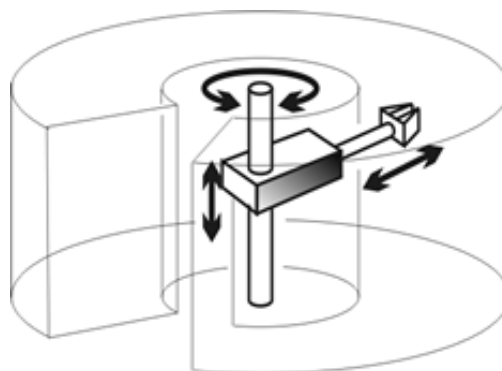


Figura 9 Robot cilíndrico

2.5.4. Robot polar

Cuenta con varias articulaciones, una lineal y dos rotacionales. Este robot utiliza la interpolación por articulación para moverse en sus dos primeras articulaciones y la

interpolación lineal para la extensión y retracción. Utiliza un brazo telescópico que puede bascular en torno a un eje horizontal. Este eje telescópico está montado sobre una base giratoria como se observa en la Figura 10. Las articulaciones proporcionan al robot la capacidad de desplazar el brazo en una zona esférica.

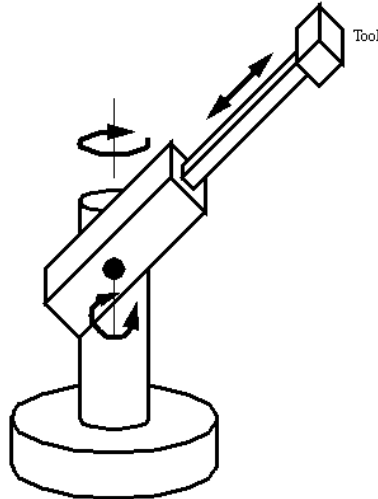


Figura 10 Robot polar

2.5.5. Robot angular o antropomórfico

Presenta una articulación con movimiento rotacional y dos angulares. Aunque el brazo articulado puede realizar el movimiento llamado interpolación lineal (para lo cual requiere mover simultáneamente dos o tres de sus articulaciones), el movimiento natural es el de interpolación por articulación, tanto rotacional como angular.

Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales. En la Figura 11 se observan los movimientos que este puede realizar.

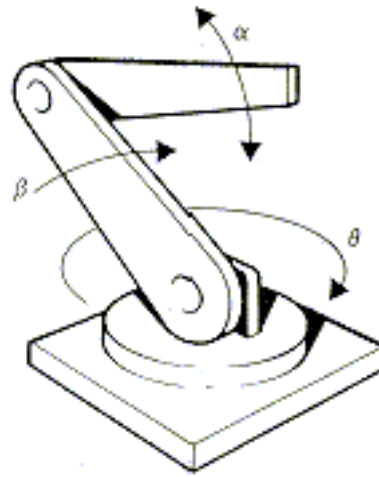


Figura 11 Robot angular

2.5.6. Robot paralelo

Los robots paralelos son cadenas cinemáticas cerradas cuyo órgano terminal, o plataforma móvil, está conectado a la base mediante varias cadenas cinemáticas seriales independientes. los robots paralelos se pueden clasificar por el número de grados de libertad que posee su plataforma móvil. pueden tener de 2 a 6 grados de libertad. En la Figura 12 se puede observar su estructura.

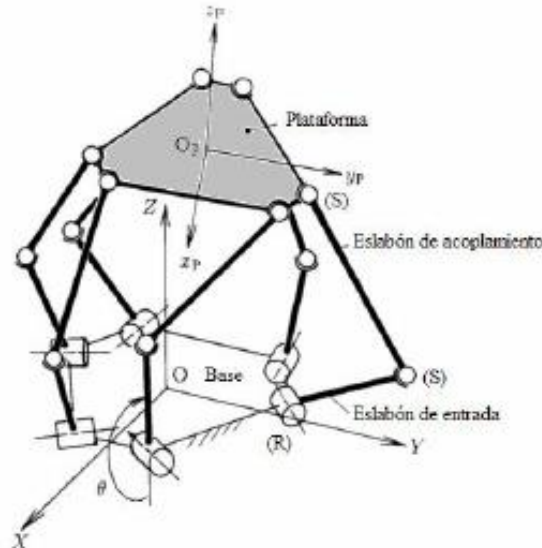


Figura 12 Robot paralelo

2.6. Tipos de motorización

Un motor convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Su trabajo depende del principio básico de que cuando se coloca un conductor de corriente en un campo magnético, se ejerce una fuerza sobre él y se desarrolla un par.

A continuación, se describen los tipos de motores más utilizados en robótica:

2.6.1. Motores DC

Los motores DC o de corriente continua son máquinas que convierten la energía eléctrica en energía mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción de un campo magnético.

El principio de funcionamiento de estos se basa en la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente cuando, de acuerdo con la Ley de Lorentz, interactúan con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en un eje. Este electroimán se denomina “rotor” y su eje le permite girar libremente entre los polos magnéticos norte y sur del imán permanente situado dentro de la carcasa o cuerpo del motor. En la Figura 13 se puede ver una visión general.

Cuando la corriente eléctrica circula por la bobina de este electroimán giratorio, el campo electromagnético que se genera interactúa con el campo magnético del imán permanente. Si los polos del imán permanente y del electroimán giratorio coinciden, se produce un rechazo y un torque magnético o par de fuerza que provoca que el rotor rompa la inercia y comience a girar sobre su eje en el mismo sentido de las manecillas del reloj en unos casos, o en sentido contrario, de acuerdo con la forma que se encuentre conectada al circuito la pila o la batería.

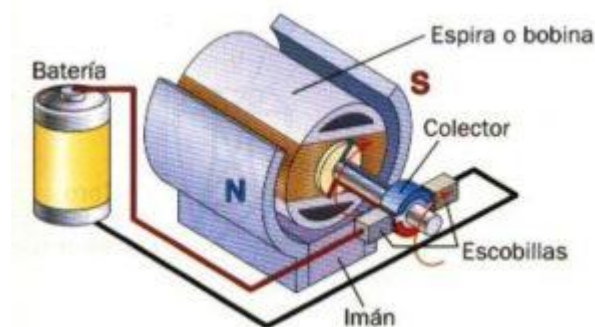


Figura 13 Funcionamiento motor DC

2.6.2. Motores brushless

Los motores Brushless son motores de corriente continua sin escobillas, son uno de los tipos de motores que más popularidad ha ganado en los últimos años. Estos

tienen la característica de que no emplean escobillas en la conmutación para la transferencia de energía; en este caso, la conmutación se realiza electrónicamente.

Esta propiedad elimina el gran problema que poseen los motores eléctricos convencionales con escobillas, los cuales producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor, son ruidosos y requieren una sustitución periódica y, por tanto, un mayor mantenimiento.

Como se observa en la Figura 14, estos están compuestos por una parte móvil que es el rotor, que es donde se encuentran los imanes permanentes, y una parte fija, denominada estator o carcasa, sobre la cual van dispuestos los bobinados de hilo conductor.

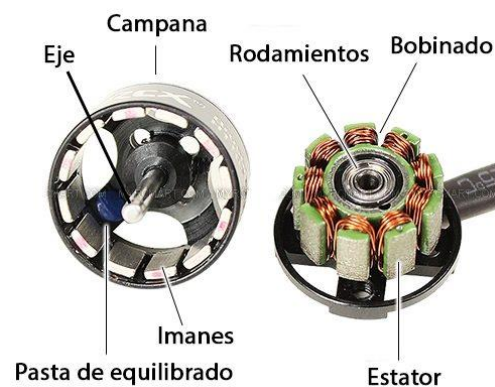


Figura 14 Partes del motor Brushless

El funcionamiento de estos motores es similar a otros motores eléctricos de imanes permanentes. Al energizar una bobina, esta crea un campo magnético. El rotor que tiene un campo magnético constante, detecta la variación y tiende a alinear el campo creado por el estator y el propio haciendo girar el rotor ya que es la parte móvil del motor. Para lograr que el rotor siga girando, antes de que se alinee por completo la bobina energizada con el rotor, se energiza la bobina que le sigue y a la anterior se la deja de alimentar. Esto provoca que el campo magnético del rotor siga al campo magnético del estator, que va variando en el tiempo, haciendo que el rotor gire. Es ligeramente complicado controlar la velocidad de giro de este tipo de motor ya que es imposible hacer los cambios de conexiones entre las terminales de los embobinados a mano, es por ello que se utiliza un ESC (controlador electrónico de velocidad) para poder variar las velocidades de giro por medio de modulación por ancho de pulsos ya sea suministrado por un microcontrolador o por un transmisor de control remoto.

2.6.3. Motores paso a paso

El motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados (paso o medio paso) dependiendo de sus entradas de control. Este motor presenta las ventajas de tener precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de 1.8° , Es por eso que ese tipo de motores son muy utilizados, ya que pueden moverse a deseo del usuario según la secuencia que se les indique a través de un microcontrolador. Estos motores poseen la habilidad de quedar enclavados en una posición si una o más de sus bobinas está energizada o bien totalmente libres de corriente.

El principio de funcionamiento está basado en un estator construido por varios bobinados en un material ferromagnético y un rotor que puede girar libremente en el estator.

Los motores paso a paso funcionan controlados por un pulso de avance, el control de un motor paso a paso no se realiza aplicando en directo este pulso eléctrico que lo hace avanzar. Estos motores tienen varios bobinados que, para producir el avance de ese paso, deben ser alimentados en una adecuada secuencia. Si se invierte el orden de esta secuencia, se logra que el motor gire en sentido opuesto. Si los pulsos de alimentación no se proveen en el orden correcto, el motor no se moverá apropiadamente. Puede ser que zumbe y no se mueva, o puede ser que gire, pero de una manera tosca e irregular.

Hacer girar un motor paso a paso se requiere un circuito de control (driver) como el de la Figura 15, que será el responsable de convertir las señales de avance de un paso y sentido de giro en la necesaria secuencia de energización de los bobinados.

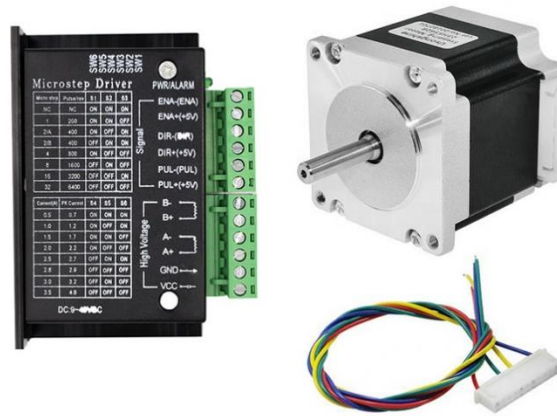


Figura 15 Motor paso a paso y su driver

Características de los motores paso a paso.

Pasos por vuelta: Los pasos por vuelta son los pasos necesarios para completar una vuelta del eje. Normalmente son 200, aunque hay de muchos otros tipos. En el caso de 200 pasos/vuelta si dividimos los 360° de una circunferencia por 200 nos da $1,8^\circ$ por paso, si en vez de 200 fueran 8 por ejemplo tendríamos que por cada paso el eje giraría 45° .

Par motor: Esta sería la fuerza del motor. El par disminuye conforme el motor aumente de velocidad. A más velocidad menos par motor. Y esto hay que tenerlo muy en cuenta porque si nos pasamos de velocidad o de aceleración el motor perderá pasos y si no tenemos unos encoders, ni el motor ni el microcontrolador tiene manera alguna de saber que se han perdido esos pasos perdiendo toda la precisión característica de estos motores.

Corriente por fase: Esta es la corriente que soporta cada bobina del motor. Y esta depende del motor.

Voltaje: Esto nos indica el voltaje que soporta el motor. Si construyéramos los anteriores drivers tendríamos que tener en cuenta este dato para no alimentar los motores a más voltaje. Pero con unos buenos drivers que tengan control de corriente podemos aumentar está en mucho y así conseguir más velocidad.

Inercia: Aquí nos indica la inercia del rotor del paso a paso, a menor inercia más aceleración y deceleración le podremos dar al motor sin que pierda pasos.

2.7. Tipos de reductoras

Las reductoras son un conjunto o sistemas de engranajes que van acoplados al eje de salida de un motor y sirven para disminuir la velocidad y aumentar el par motor o viceversa.

Por ejemplo, si tenemos una reducción de 5:1, la polea del eje motriz debe de dar 5 vueltas para que la polea conducida de una sola vuelta. Esto nos da la ventaja de que tendremos 5 veces más el par del motor sacrificando la velocidad que será 5 veces menor.

A continuación, se explicarán las reductoras más relevantes que se usan en brazos robóticos:

2.7.1. Reductor por engranajes y correas

Los sistemas de transmisión de poleas y correas se emplean para transmitir la potencia mecánica proporcionada por el eje del motor entre dos ejes separados entre sí por una cierta distancia como en la Figura 16. La transmisión del movimiento por correas se debe al rozamiento éstas sobre las poleas cuyo valor depende, sobre todo, de la tensión de la correa y de la resistencia de ésta a la tracción; es decir, del tipo de material con el que está construida (cuero, fibras, hilos metálicos recubiertos de goma, etc.) y de sus dimensiones.

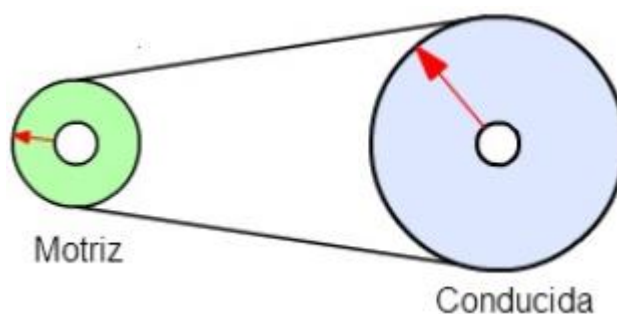


Figura 16 Transmisión por correa

Las **poleas** son ruedas con varios dientes, sobre las cuales se apoyan las correas.

Las **correas** son cintas cerradas que se emplean para transmitir movimiento de rotación entre dos ejes generalmente paralelos. Pueden ser de forma plana, redonda, trapezoidal o dentada.

La relación de reducción se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Relación de reducción} = \frac{\text{Número de dientes de p Polea de salida}}{\text{Número de dientes de p Polea de entrada}}$$

Para evitar que las correas se salgan de las poleas, será necesario que las primeras se mantengan lo suficientemente tensas como para que sean capaces de transmitir la máxima potencia entre ejes sin llegar a salirse ni romperse. Para evitar este problema se emplean a veces rodillos tensores, los cuales ejercen sobre las correas la presión necesaria para mantenerlas en tensión.

2.1.1. Reductor planetario

Un reductor planetario o engranaje epicicloidal es un elemento mecánico que se monta junto a cualquier tipo de motor eléctrico. Su finalidad es disminuir la velocidad del eje del motor y, por el contrario, aumentar en la misma medida su capacidad de transmisión de par.

Esto se consigue mediante un sistema de engranajes compuesto por uno o más engranajes llamados planetas, que rotan sobre un engranaje central o sol. Tal y como vemos en Figura 17, la combinación del sol, los planetas y una corona dentada, crean la relación de reducción, que será el factor tanto de disminución de velocidad como de aumento de par que hemos comentado antes.

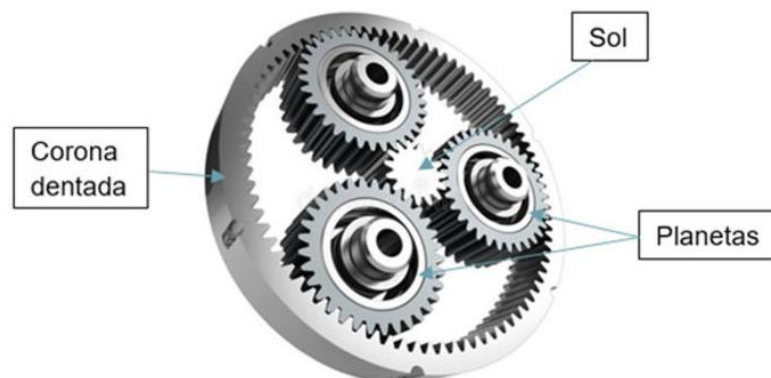


Figura 17 Composición del reductor planetario

Este tipo de reductoras se caracterizan por las siguientes características:

- **Mayor repetibilidad:** Su mayor velocidad de carga radial y axial ofrece confiabilidad y robustez, minimizando la desalineación del engranaje. Además, la transmisión uniforme y las bajas vibraciones a diferentes cargas proporcionan una repetibilidad perfecta.

- **Perfecta precisión:** La mayor estabilidad angular giratoria mejora la precisión y fiabilidad del movimiento.

- **Menor nivel de ruido porque hay más superficie de contacto.** El rodamiento es mucho más suave y los saltos son prácticamente inexistentes.

- **Mayor durabilidad:** Por su rigidez torsional y mejor rodadura. Para mejorar esta característica, sus rodamientos ayudan a reducir las pérdidas que se producirían al frotar el eje contra la caja directamente. Así, se consigue una mayor eficiencia del engranaje y un funcionamiento mucho más suave.

- **Muy buenos niveles de eficiencia:** Los reductores planetarios ofrecen una mayor eficiencia y gracias a su diseño y disposición interna se minimizan las pérdidas durante su trabajo. De hecho, a día de hoy, este tipo de mecanismos de accionamiento son los que ofrecen una mayor eficiencia.

- **Mayor transmisión de torque:** con más dientes en contacto, el mecanismo puede transmitir y soportar más torque. Además, lo hace de una manera más uniforme.

2.1.2. Reductor cicloidal

La reductora cicloidal es un tipo único de reductor de velocidad que proporciona una relación de reducción muy alta con un diseño compacto pero robusto. En comparación con las transmisiones de engranajes convencionales, como las de dientes rectos y planetarios, puede lograr relaciones de reducción mucho más altas, de hasta 10 veces en el mismo espacio o etapa. Además, cuenta con prácticamente cero juego (zero-backlash), mayor capacidad de carga, rigidez y alta eficiencia de hasta el 90%. Estas propiedades hacen que las reductoras cicloidales sean

adecuados para muchas aplicaciones en las que la precisión de posicionamiento y el rendimiento son importantes, como la robótica, las máquinas herramienta, etc.

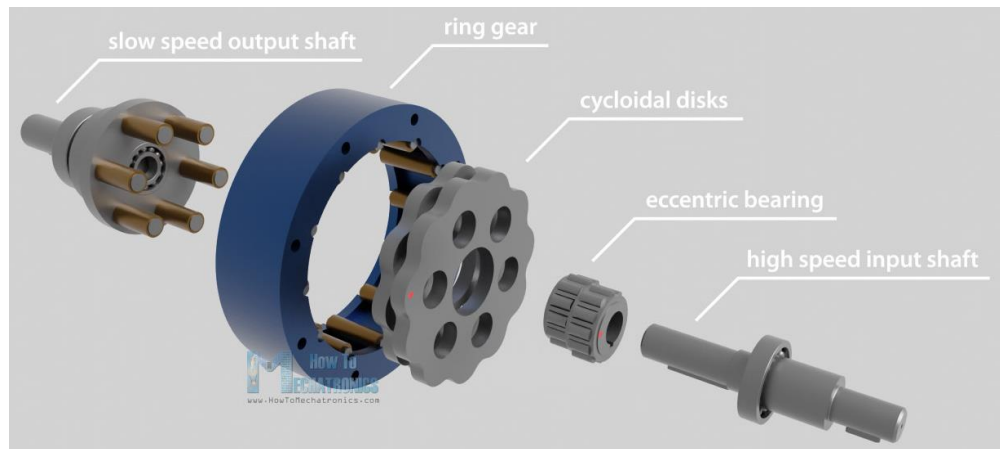


Figura 18 Vista explosionada del cicloidal

Como podemos observar en la Figura 18, una transmisión cicloidal se compone de cinco componentes principales, un eje de entrada de alta velocidad, un cojinete excéntrico o leva cicloidal, dos discos cicloidales, una corona dentada con pasadores y rodillos, y un eje de salida de baja velocidad con pasadores y rodillos. Montando el conjunto, la reductora quedaría como la Figura 19.

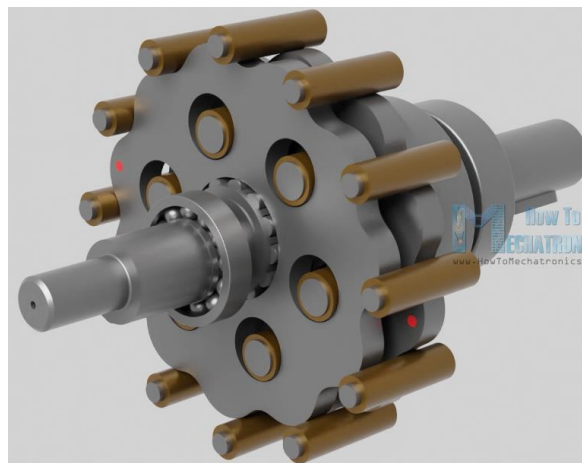


Figura 19 Vista del conjunto

El eje de entrada impulsa el rodamiento excéntrico, y el rodamiento excéntrico impulsa los discos cicloidales alrededor de la circunferencia interna de la carcasa de la corona. El movimiento excéntrico hace que los dientes o lóbulos de los discos cicloidales se enganchen en los rodillos de la carcasa de la corona dentada de manera que produzcan una rotación inversa a una velocidad reducida.

Podemos echar un vistazo más de cerca en la Figura 20 y ver que el cojinete excéntrico en realidad está empujando el disco cicloidal contra los rodillos de la corona.

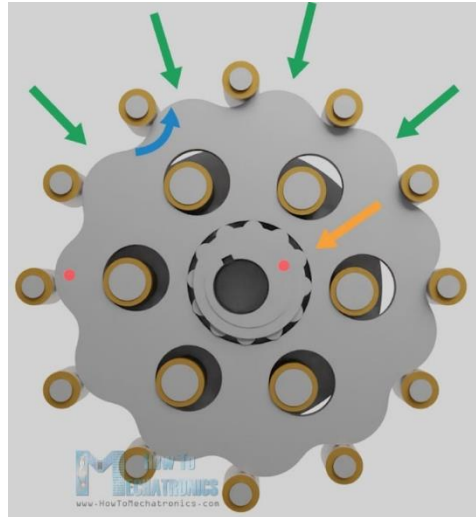


Figura 20 Movimiento del disco

En general, hay un lóbulo cicloidal menos en el disco en comparación con el número de pasadores en la carcasa de la corona. Esto hace que, para una rotación completa del cojinete excéntrico, el disco cicloidal se mueva solo una distancia de un lóbulo. De esto podemos ver en la Figura 21 que la relación de reducción depende únicamente del número de pasadores de la corona.

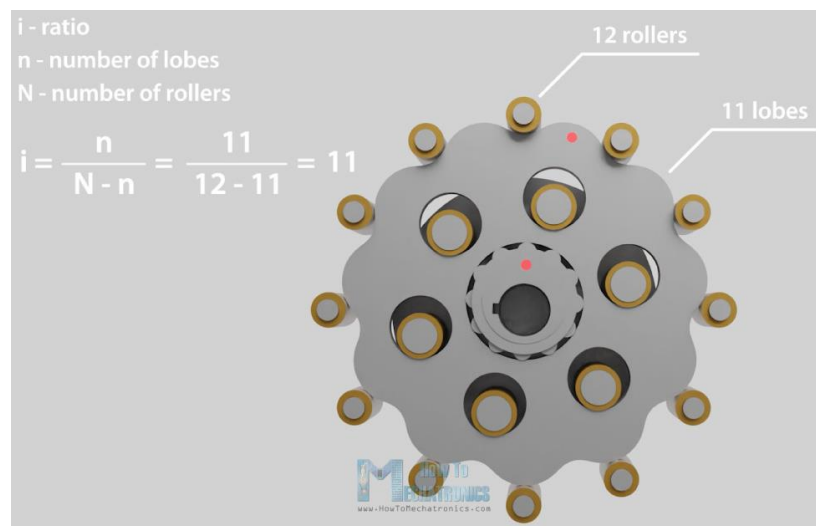


Figura 21 Cálculo de la relación de reducción

Por ejemplo, aquí tenemos 12 pines en la corona dentada, lo que significa 11 lóbulos en el disco cicloidal, y esa es una relación de 11:1, u 11 veces la velocidad de

salida más lenta. El tamaño de los discos, los rodillos de la corona o el rodamiento excéntrico no afectan en absoluto a la relación de reducción.

La rotación reducida se transmite a los pasadores del eje de salida a través de los agujeros que hay en el interior de los discos cicloidales.

Hay dos discos cicloidales, colocados desfasados 180 grados para compensar las fuerzas de desequilibrio causadas por el movimiento excéntrico y proporcionar un funcionamiento más suave a velocidades más altas.

Sus características principales son:

El empleo de coronas cicloidales le otorgan a estos reductores unas características particulares que los diferencian de sus homólogos de perfil de evolvente. A continuación, se exponen algunas de estas características.

- **Resistencia a choque:** los engranajes cicloidales mantienen hasta la mitad de sus dientes en contacto en todo momento, permitiendo así absorber y distribuir mejor las cargas de choque que sus homólogos de perfil de evolvente.

- **Menor ruido y vibraciones:** el perfil del engranaje cicloidal y los pines de engrane están diseñados de forma que no existan discontinuidades de contacto, eliminando así los choques y las vibraciones que estos generan.

- **Reducido backlash:** Al asegurarse el engrane en todo momento, se reduce o elimina la posibilidad de pérdida de movimiento o backlash, haciéndolos particularmente atractivos en aplicaciones de precisión o control de movimiento.

- **Mayor reducción por etapa:** gracias a una mejor distribución de la carga, en reductores cicloidales se pueden alcanzar reducciones de hasta 100:1 en una sola etapa a diferencia de los 8:1 habituales de los engranajes habituales.

- **Tamaño reducido y construcción compacta:** la posibilidad de aplicar mayores reducciones por etapa permite un diseño más compacto para unas mismas condiciones de contorno.

2.1.3. Reductor armónico

El reductor armónico es un tipo único de sistema de engranaje mecánico que permite una relación de reducción muy alta en un paquete compacto y liviano. En comparación con los sistemas de engranajes tradicionales, como los engranajes helicoidales o los engranajes planetarios, puede lograr relaciones de reducción mucho más altas de hasta 30 veces en el mismo espacio. Además de eso, tiene una característica de zero backlash, alto par, precisión y confiabilidad. Por lo tanto, este sistema de engranajes se utiliza en muchas aplicaciones, incluidas la robótica, la industria aeroespacial, las máquinas médicas, las fresadoras, los equipos de fabricación, etc.

Este tipo de reductora tiene tres componentes clave como se muestra en la Figura 22: un generador de ondas (wave generator), una corona flexible (flex spline) y una corona exterior (circular spline).

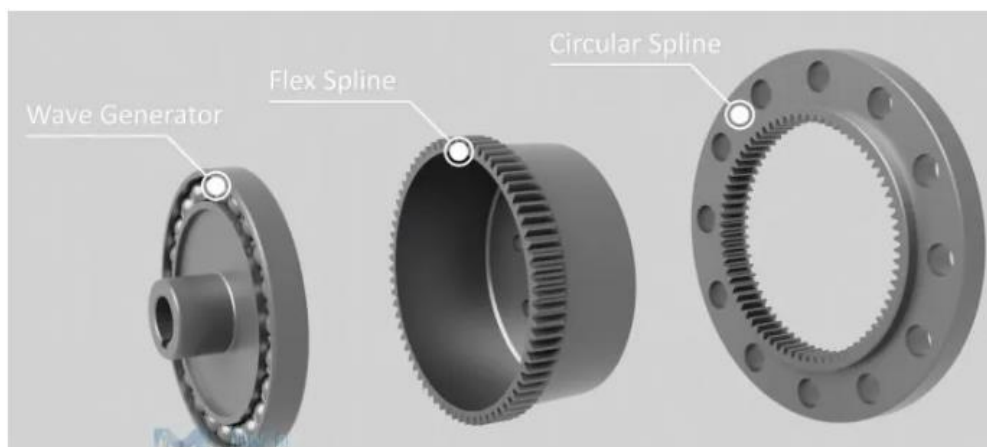


Figura 22 Composición del reductor armónico

El generador de ondas tiene una forma elíptica y consta de un centro elíptico y un cojinete especial de pared delgada que sigue la forma elíptica del centro. Esta es la entrada del conjunto de engranajes y está conectado al eje del motor. A medida que el generador de ondas gira, genera un movimiento ondulatorio.

La corona flexible tiene la forma de una copa cilíndrica y está hecho de un material de aleación de acero flexible pero resistente a la torsión. Los lados de la copa son muy delgados pero el fondo es grueso y rígido. Esto permite que el extremo abierto de la copa sea flexible, pero el extremo cerrado sea bastante rígido y por lo

tanto podemos usarlo como salida. La ranura flexible tiene dientes externos en el extremo abierto de la copa.

Por otro lado, la corona exterior es un anillo rígido con dientes en el interior. La corona circular tiene dos dientes más que la corona flexible, que en realidad es el diseño clave del sistema de engranajes de ondas de tensión.

A medida que el generador de ondas gira, deforma radialmente el extremo abierto de la corona flexible. Luego, el generador de ondas y la corona flexible se colocan dentro de la corona circular con los dientes en el interior, engranando los dientes.

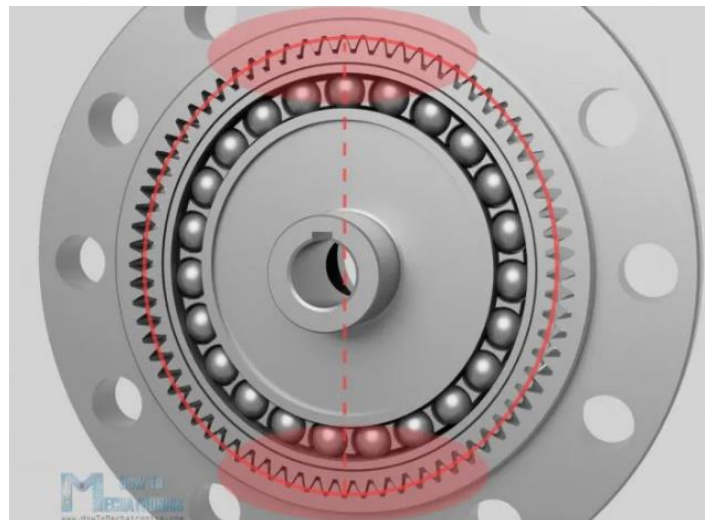


Figura 23 Zona de engranaje

Debido a la forma elíptica de la corona flexible, se puede observar en la Figura 23 que los dientes engranan solo en dos regiones en los lados opuestos de la ranura flexible, y eso es a lo largo del eje principal de la elipse del generador de ondas.

Ahora, a medida que gira el generador de ondas, los dientes de la corona flexible que están engranados con los de la corona circular cambiarán lentamente de posición. Debido a la diferencia de número de dientes entre la corona flexible y la corona circular, por cada rotación de 180 grados del generador de ondas, el engrane de los dientes hará que la corona flexible gire un poco hacia atrás en relación con el generador de ondas. En otras palabras, con cada rotación de 180 grados del generador de ondas, los dientes de la corona flexible engranan con la ranura circular avanzarán solo un diente.

Entonces, para una rotación completa de 360 grados del generador de ondas, la corona flexible cambiará de posición o avanzará dos dientes.

Por ejemplo, si la corona flexible tiene 200 dientes, el generador de ondas tiene que dar 100 vueltas para que la corona flexible avance 200 dientes, o eso es solo una rotación para la corona flexible. Esa es una relación de 100:1. En tal caso, la corona circular tendrá 202 dientes, ya que el número de dientes de la corona circular siempre es mayor que los dientes de la corona flexible en dos.

Podemos calcular fácilmente la relación de reducción con la siguiente fórmula:

$$\text{Relación de reducción} = \frac{\text{Dientes de corona flexible} - \text{dientes de corona exterior}}{\text{Dientes de corona flexible}}$$

3. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ROBOT ELEGIDO A CONSTRUIR

Después de investigar sobre la mayoría de los robots industriales que existen en el mercado y conocer su estructura y parámetros que los caracterizan, el brazo que resulta más interesante es el **robot angular de 6 grados de libertad** por su estructura ya que podemos decir que este es general para muchas aplicación ya que hay otras que solo sirven para una aplicación en concreto aunque no se destaca que todos se parecen en el sistema de funcionamiento y solo difieren en la estructura y construcción.

Para la elección de las reductoras se ha tenido en cuenta principalmente si es posible la elaboración de estos por una impresora 3D. En este punto se descarta el reductor armónico ya que este lleva una parte flexible con unos dientes relativamente pequeños y conseguir que el conjunto funcione bien en un espacio reducido con un filamento flexible va a ser complicado. Para ello se ha optado por utilizar en el brazo el **reductor cicloidal, planetario y por poleas dentadas** ya que estos si son más factibles hacerlos en 3D “asegurándonos” el correcto funcionamiento de estos. Y para la decisión de donde iría cada tipo de reductora dependería del espacio disponible en las articulaciones que se verá conforme evoluciona el diseño del brazo.

Cabe destacar que la transmisión de los motores a las reductoras iría por medio de correas hechas en la impresora 3D con filamento flexible.

Para la selección de los motores se ha tenido en cuenta el presupuesto disponible ya que estos se llevan una parte importante del coste y también los conocimientos para su control.

Para ello, para la construcción del brazo robótico se han elegido los **motores paso a paso NEMA 23** (Figura 24 y Figura 25) y **NEMA 17** (Tabla 3 Características motor 17HS25-1504S1

Figura 26 y Tabla 4 Características motor 17HS13-0404S1

Figura 27) por las razones de que son económicos y se pueden controlar con mucha precisión sin necesidad de añadir un encoder. Esto hace que el sistema sea

en bucle abierto sin posibilidad de tener una realimentación, pero calculando bien las reductoras, no habría problema ya que el motor no perdería pasos. A continuación, se muestran las características de dichos motores.



Figura 24 Motor 23HS32-4004S

Número de pieza del fabricante	23HS32-4004S
Tipo de motor	Bipolar Stepper
Tamaño de montura	57 x 57mm
Longitud del motor	82mm
Ángulo de paso	1.8 deg
Par de sujeción	2.4Nm
Corriente/fase nominal	4A
Resistencia de fase	0.9ohms

Tabla 1 Características motor 23HS32-4004S

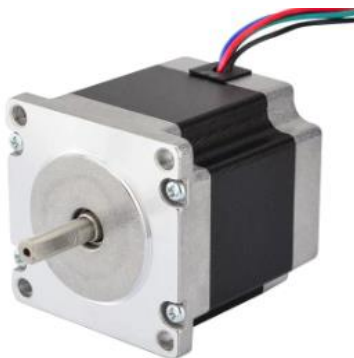


Figura 25 Motor 23HS22-2804S

Número de pieza del fabricante	23HS22-2804S
Tipo de motor	Bipolar Stepper
Tamaño de montura	57 x 57mm
Longitud del motor	56mm
Ángulo de paso	1.8 deg
Par de sujeción	1.26Nm
Corriente/fase nominal	2.8A
Resistencia de fase	0.9ohms
Inductancia	2.5mH

Tabla 2 Características motor 23HS22-204S



Figura 26 Motor 17HS15-1504S1

Número de pieza del fabricante	17HS15-1504S1
Tipo de motor	Bipolar Stepper
Tamaño de montura	42 x 42mm
Longitud del motor	39mm
Ángulo de paso	1.8 deg
Par de sujeción	45Ncm
Corriente/fase nominal	1.5A
Voltaje	12-24V
Resistencia de fase	2.3ohms
Inductancia	4.4mH

Tabla 3 Características motor 17HS25-1504S1



Figura 27 Motor 17HS13-0404S1

Número de pieza del fabricante	17HS13-0404S1
Tipo de motor	Bipolar Stepper
Tamaño de montura	42 x 42mm
Longitud del motor	34mm
Ángulo de paso	1.8 deg
Par de sujeción	26Ncm
Corriente/fase nominal	0.4A
Voltaje	12V
Resistencia de fase	30ohms
Inductancia	37mH

Tabla 4 Características motor 17HS13-0404S1

Estaba también la opción de los motores Brushless o motores sin escobilla, pero en estos tendríamos que irnos a motores muy grandes con mucho par que terminan ocupando mucho espacio y son bastante más caros. También otra desventaja es que se necesita un encoder para poder controlar la posición.

En principio, para el accionamiento del punto terminal que sería una pinza se eligió un servomotor SG90 ya que tiene la opción de realimentación integrada pero este gira solamente 180°.

Mientras se llevaba a cabo el diseño de la pinza, se dió cuenta que se necesita un giro continuo por lo que no se encontró un pequeño servomotor que gire continuamente. Para ello, se ha optado por un pequeño **motorreductor DC** que viene ya con una reductora integrada en el propio motor (Figura 28). La desventaja de este es que el motor que disponíamos no tenía encoder para el control de posición.



Figura 28 Motor 12GAN20-100

Modelo	12GAN20-100
Voltaje	6V a 12V
RPM	300
Corriente sin carga	0.05A
Par con carga	0.60Kg*Cm
Corriente con carga	0.09A
Par de sujeción	4Kg*Cm
Corriente de sujeción	0.3A

Tabla 5 Características motor 12GAN20-100

3.1. Selección de componentes electrónicos

3.1.1. Driver motor paso a paso

Como se ha visto en el apartado anterior, para el funcionamiento de los motores paso a paso se necesita de un driver. Para dicha selección, la característica más importante es la corriente que pueden soportar estos ya que si es menor de la que lo motor consume se quemarían. En este caso, se ha optado que para los motores NEMA 23, unos **drivers TB6600** como el de la Tabla 6 Características driver TB6600

Figura 29 que soportan una corriente de hasta 4A y para los NEMA 17, unos **drivers DRV825** como el de la Figura 30 que soportan una corriente de 2.5A. Ambos admiten una entrada de voltaje de hasta 40v aproximadamente. Cabe destacar que había drivers de más calidad haciendo que el motor funcione más silenciosamente, pero estos eran costosos y hacían que el presupuesto aumentara bastante y como es un proyecto con fines educativos y de aprendizaje, no merecía la pena.



Figura 29 Driver TB6600

Nombre chip	TB6600HG
Numero de canales	1
Voltaje lógico	2V a 5.5V
Temperatura funcionamiento	-30 °C a 85 °C
Voltaje de operación	8V a 42V
Capacidad de corriente	0.5A a 4A

Tabla 6 Características driver TB6600

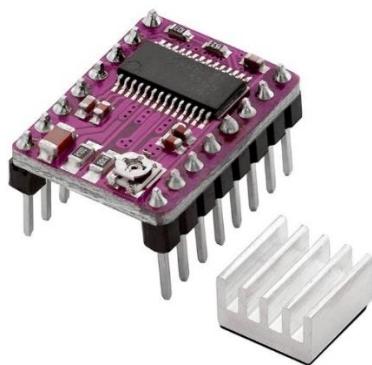


Figura 30 Driver DRV8825

Nombre chip	DRV8825
Numero de canales	1
Voltaje lógico	2.2V a 5.25V
Temperatura funcionamiento	-40 °C a 150 °C
Voltaje de operación	8.2V a 45V
Capacidad de corriente	1.5A a 2.2A

Tabla 7 Características driver DRV8825

3.1.2. Drivers motor DC

Para el driver del motor DC, como es un motor pequeño y apenas consume corriente, se ha optado por el **driver L298N** como el de la Figura 31. Este es un puente H donde se pueden controlar hasta dos motores DC. Este driver soporta una corriente máxima de 2A con un voltaje de hasta 35v.

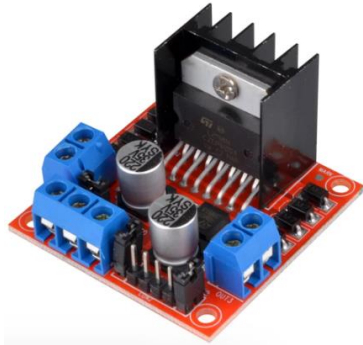


Figura 31 Driver L298N

Nombre chip	L298N
Numero de canales	2
Voltaje lógico	5V
Corriente lógica	0mA a 36mA
Temperatura funcionamiento	-20 °C a 135 °C
Voltaje de operación	5V a 35V
Capacidad de corriente	2A (con picos de 3A)
Potencia máxima	25W

Tabla 8 características driver L298N

3.1.3. Sensores

Para el control de la posición “0” o “home” de las articulaciones que sería el punto inicial de los motores donde empiezan a contabilizarse los pasos, se han elegido dos tipos de sensores según el tipo de movimiento y espacio disponible: sensores de contacto y sensores magnéticos.

Sensor de contacto:

Un final de carrera o también conocido como **sensor de contacto**, básicamente es un interruptor mecánico como el de la Figura 32 que se activa cuando se pulsa.



Figura 32 Sensor final de carrera de contacto

Sensor magnético:

El **sensor magnético de efecto Hall A3144** (Figura 33) es un sensor que cumple con los requisitos para el control de posición. Este es un sensor unipolar de salida digital de colector abierto que requiere una resistencia de pull-up. Detecta la presencia o ausencia de un campo magnético (polo sur) entregando un nivel alto o bajo en su pin de salida pin 3.

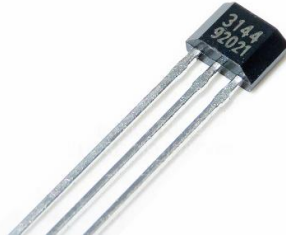


Figura 33 Sensor magnético A3144

3.1.4. Sensor de temperatura:

Para el sensor de temperatura se ha tenido que elegir uno que sea pequeño ya que este irá pegado a los motores. En el mercado había varios tipos como el LM35, pero este no es el adecuado ya que era analógico y un poco inestable. Por lo tanto, se ha elegido el **DS18B20** de Dallas Temperature (Figura 34), siendo este un sensor digital con comunicación OneWire. Este sensor aparte de ser bastante estable y preciso, tiene la ventaja de que se pueden conectar todos a un mismo pin ya que estos tienen una dirección de identificación única para cada sensor gracias al protocolo de comunicación OneWire.

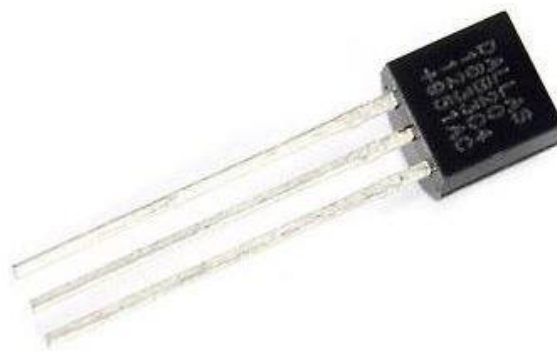


Figura 34 Sensor DS18B20

3.1.5. Microcontrolador:

Para el control del brazo se necesita de un microcontrolador, pero antes de elegir uno hay que tener en cuenta varias características que debe de tener este. Primeramente, el número de entradas y salidas, el número de los puertos seriales, la capacidad de memoria entre otras características. En segundo lugar, no hay que dejar de lado la parte económica ya que el coste de este varía bastante dependiendo de la placa que es. Y, por último, es interesante destacar que la intuitividad y popularidad del microcontrolador también importan ya que encontraremos mucha información y nos facilitaría mucho investigar sobre el mismo en caso de tener algún problema en la programación, por ejemplo.

Dadas las características mencionadas antes, las cumple perfectamente la placa **Arduino Mega 2560** (Figura 35).

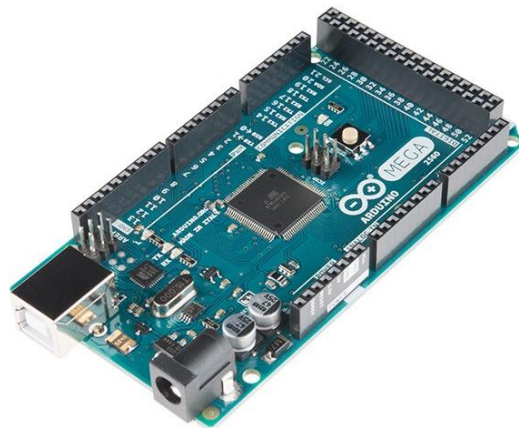


Figura 35 Arduino Mega 2560

Arduino Mega es una tarjeta de desarrollo código abierto construida con un microcontrolador modelo Atmega2560 que posee pines de entradas y salidas (E/S), analógicas y digitales. Esta tarjeta es programada en un entorno de desarrollo como puede ser C++ en el propio IDE de Arduino.

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje operativo	5V
Voltaje de entrada	7V a 12V
Pines de entrada y salida	54 (de los cuales 15 proveen salida PWM)
Pines analógicos de entrada	16

Puertos de comunicación	4 UARTs, USB, pines RX y TX para comunicación, y también TWI y SPI.
Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida	40 mA
Corriente DC entregada en el Pin 3.3V	50 mA
Memoria flash	256 KB (8KB usados por el bootloader)
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Clock Speed	16 MHz

Tabla 9 Características del Arduino Mega 2560

3.1.6. Pantalla táctil

Para la interacción con el brazo se ha optado por hacerlo mediante una pantalla táctil para así no depender siempre de un ordenador. Las pantallas si son costosas y sobre todo si es táctil. Después de buscar varios fabricantes, por popularidad y facilidad de uso se ha elegido una pantalla Nextion de 7" como la que se muestra en Figura 36..



Figura 36 Pantalla Nextion NX8048K070

Model	NX8048K070
Color	65536 colors
Resolution	800×480 pixel
Touch type	Resistive
Operating Voltage	4.75V a 7V
Operating Current	510mA
Working Temperature	-20 °C - 70 °C
Serial Port Baudrate	2400bps a 115200bps
Serial Port Mode	TTL
SD card socket	Yes (max 32gb Micro SD Card)

Extended IO	8 Digital extended GPIO
RTC	built-in RTC support (Battery type: CR1220)
FLASH Memory	32MB
User Storage EEPROM	1024 Byte
RAM Memory	8192 Byte
Instruction Buffer	1024 Byte

Tabla 10 Características de la pantalla Nextion

3.1.7. Fuente alimentación

Para la alimentación se ha tenido que hacer un cálculo aproximado del consumo que tendrá la electrónica. El cálculo quedaría de la siguiente forma:

M1	M2	M3	M4	M5	M6	Pinza	Resto electrónica	Total
2.8A	4A	2.8A	2.8A	1.5A	0.4A	0.1A	~1A	15.4A

Tabla 11 Cálculo de potencia de la fuente de alimentación

Sabiendo la corriente total que se necesita para abastecer el consumo de la electrónica y motores, quedaría decidir el voltaje. Para ello, se ha decidido un voltaje de 24V ya que a más voltaje, la corriente se reduce. Esto haría que el cableado por ejemplo de los motores sea de menos sección. Por lo tanto, la **fuente de alimentación** ideal es una de **24v y 400W** (Figura 37).



Figura 37 Fuente alimentación 24v y 400W

3.1.8. Reguladores de voltaje

El regulador de voltaje es necesario para reducir el voltaje de 24v a 12V, ya que muchos de los componentes trabajan a ese voltaje. Por ejemplo, los NEMA 17 solo soportan 12V, en caso de aplicarles más, se calientan. El microcontrolador junto al motor DC también soportan una tensión máxima de 12V. Sabiendo esto, se ha elegido el **regulador de tipo conmutado LM2596** que soporta hasta 3^a (Figura 38), suficiente corriente para los dispositivos que se van a conectar al mismo.

Estos reguladores son mejores que los lineales ya que los lineales “desperdician” la energía no utilizada en calor y pueden llegar a calentarse demasiado.



Figura 38 Regulador de voltaje LM2596

Nombre del módulo	DC-DC Buck Step down LM2596
Voltaje de entrada	4.5V a 40V DC
Voltaje de salida	1.23V a 37V DC
Corriente de Salida	máx. 3A
Potencia de salida	25W
Eficiencia de conversión	92%
Temperatura de trabajo	-45 °C a 85 °C
Protección de sobre-temperatura	Si (apaga la salida)
Protección de corto circuito	Si (hasta 5A)
Protección limitadora de corriente	SI
Protección frente a inversión de polaridad	No

Tabla 12 Características del regulador LM2596

Hay que tener en cuenta que la pantalla funciona a 5V y con la corriente que entrega el regulador del microcontrolador no es capaz de encenderse por lo tanto se necesitaría de otro regulador de 5V. En este caso, el **regulador MP1584EN** (Figura 39) sería una buena elección.



Figura 39 Regulador MP1584EN

Nombre del módulo	DC-DC Buck Step down MP1584EN
Voltaje de entrada	4.5V a 28V DC
Voltaje de salida	0.8 a 20V DC
Corriente de Salida	máx. 3A
Eficiencia de conversión	96%
Temperatura de trabajo	-45 °C a 85 °C
Frecuencia de conmutación	1 MHz

Tabla 13 Características del regulador MP1584EN

3.1.9. Otros componentes

Otros componentes que se han utilizado en la construcción son:

- Dos **relés** internos en caso de que queramos activar una carga.
- Una **seta de emergencia** para poder realizar una parada de inmediato en caso de emergencia.
- **Conector hembra de 3 pines** a 220v para poder enchufar el cable de corriente.
- **Interruptor** para encender la fuente de alimentación permitiendo así el paso de la corriente al brazo robótico.
- **Leds RGB** para indicar los diferentes estados en los que se encuentra el brazo.
- **Conectores y bornas** para poder conectar sensores y actuadores.
- **Resistencias** de diferentes valores.

4. DISEÑO DE REDUCTORAS DE PROTOTIPO

Antes de comenzar con el diseño del brazo robótico, cabe destacar que se han hecho prototipos de reductoras con el fin de hacer unas pruebas de experimentación sobre el funcionamiento de los mecanismos de las reductoras para así poner en práctica los conocimientos e investigaciones que se han hecho. Esto ha sido de mucha ayuda para aclarar muchas de las dudas que han ido surgiendo tanto en los cálculos como en diseño evitando así que el futuro diseño del robot planteado no sea un proyecto fallido.

Como prueba se han diseñado una reductora cicloidal y otra de tipo planetario. En ambas reductoras se ha hecho la prueba de motorizarlos con un motor paso a paso **NEMA 17** (Figura 42) y luego otro **Brushless de 380KV** (Figura 40) controlándolo con un **ESC BLHeli de 40A** (Figura 41). En las Tabla 14 y Tabla 15 se pueden ver las características de dichos motores.



Figura 40 Motor brushless 380kv

KV	380KV
Diamtero estator	41mm
Longitud estator	8mm
Diamtero eje	4mm
Nº de celdas LiPo	3s-6s
Corriente maxima	17.2A
Potencia maxima	381W
Resistencia interna	0.1932ohm

Tabla 14 Características motor brushless



Figura 41 ESC BLHeli 40A

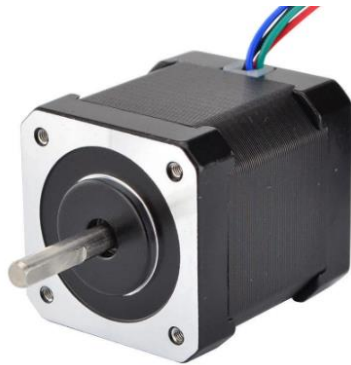


Figura 42 Motor 17HS19-2004S1

Número de pieza del fabricante	17HS19-2004S1
Tipo de motor	Bipolar
Tamaño de montura	42 x 42mm
Longitud del motor	47mm
Ángulo de paso	1.8°
Par de sujeción	59Ncm
Corriente/fase nominal	2A
Voltaje	12V a 24V
Resistencia de fase	1.4ohm
Inductancia	3mH

Tabla 15 Características motor 17HS19-2004S1

Después de elegir los motores para el prototipo, se diseñaron las reductoras (en los siguientes apartados se explicará todo el procedimiento del diseño) y se hicieron pruebas de peso a diferentes longitudes. Se tomaron los datos de las dos versiones de motores para luego compararlos con los teóricos y se observó que el motor Brushless tenía más velocidad, pero menos fuerza que el motor paso a paso y que se necesitaba una reductora mayor en el motor brushless para conseguir levantar la misma carga que el motor paso a paso.

Para el programa de diseño se ha elegido **SOLIDWORKS**. Esta elección no se basa en nada, es simplemente por la experiencia y conocimientos que se tenían anteriormente del mismo.

En las siguientes figuras se pueden observar los diferentes prototipos que se diseñaron para el estudio de cada caso.

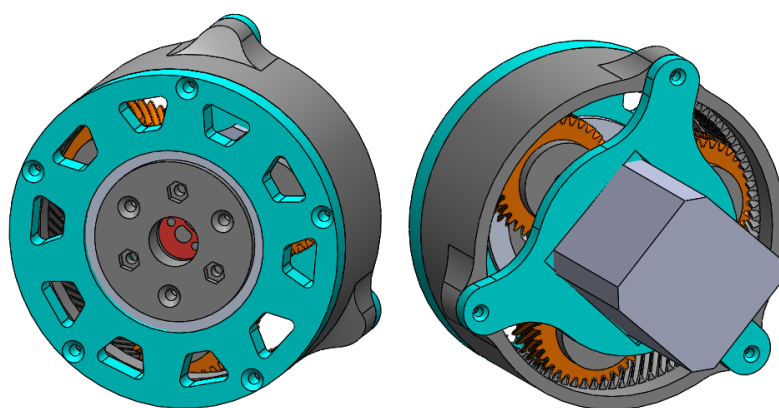


Figura 43 Reductor planetario con motor paso a paso directo

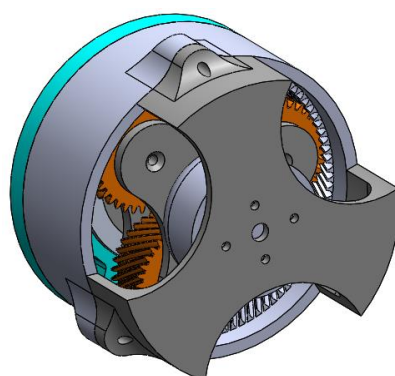


Figura 44 Reductor planetario con motor brushless directo

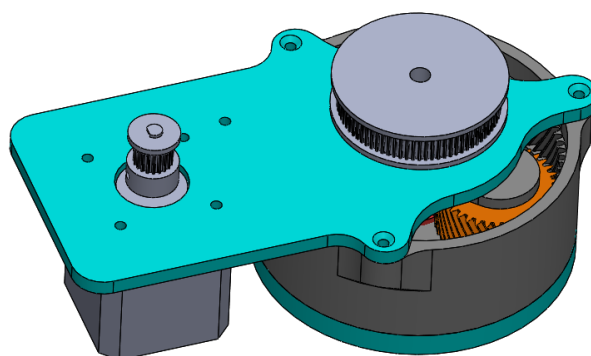


Figura 45 Reductor planetario con motor paso a paso mediante poleas dentadas

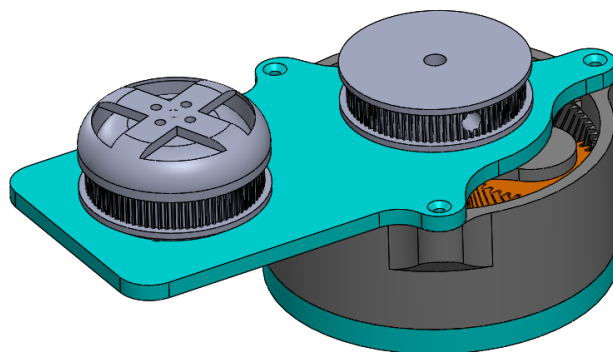


Figura 46 Reductor planetario con motor Brushless mediante poleas dentadas

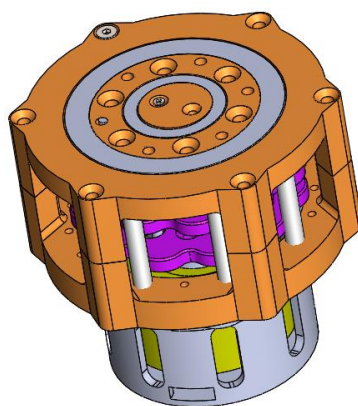


Figura 47 Reductor cicloidal con motor Brushless directo

5. DISEÑO DEL BRAZO ROBÓTICO

Después de haber elegido el tipo de robot y el material, se empezará el diseño desde la articulación 6 e iremos para atrás hasta llegar a la articulación 1 para así ir calculado el peso que tiene que soportar la siguiente articulación, aunque en más de una ocasión se ha tenido que retocar y modificar el diseño de la articulación anterior para que puedan encajar todas las piezas de los ensamblajes.

Mientras se diseñaba el conjunto, se ha preferido diseñar cada pieza por separado ya que en caso de querer modificar o repetir alguna pieza sea más fácil y rápido y así se gastaría menos plástico.

5.1. Articulación 6:

Para la articulación 6, se ha decidido poner una **reductora de tipo planetario** para así poder experimentar con este tipo de reductora ya que este es utilizado en muchas aplicaciones como el cambio de marcha de un coche automático.

Teniendo claro el tipo de reductora, entonces ahora tendríamos que calcular la fuerza que tendrá la articulación y a raíz de eso calcular la relación de reductora necesaria.

Para el peso extra de seguridad no se le ha añadido **ningún sobrepeso** ya que en esta articulación estaría el punto terminal.

Peso de la pinza del punto terminal	Peso de tornillos/estructura (kg)	Peso máximo carga (kg)	Margen extra (kg)	Total (kg)
0.5	0	1	0	1.5

Tabla 16 Cálculo del peso de la articulación 6

Cabe destacar que en esta articulación no tenemos transmisión por correa por lo que la salida del motor ira directamente a la entrada del reductor planetario.

Viendo las características del motor de la Tabla 4, sabemos que el motor tiene un par de sujeción de 26N*cm por lo tanto convertimos dicho valor a Kg*cm para facilitarnos los cálculos:

$$\text{Par (Kg} \cdot \text{cm)} = \text{Par(N} \cdot \text{cm)} \cdot \frac{1\text{kg}}{9.81\text{N}} \quad (\text{Fórmula 1})$$

$$26\text{N} \cdot \text{cm} \cdot \frac{1\text{Kg}}{9.81\text{N}} = 2.65\text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

Hay que tener en cuenta que los 2.65 Kg · cm es el **par de sujeción y no el par de carga**. Esto es muy importante tenerlo en cuenta ya que el par de sujeción es para bloquear el motor en una posición, pero no para levantar una carga. Para levantar una carga, el motor necesita más fuerza para vencer la inercia del motor que normalmente es alta según el peso y la distancia a la que se encuentra esta. Por lo tanto, se concluye que el par de carga es mucho mayor al par de sujeción. Para el “dimensionado”, se ha cogido que el **par de carga es un 50% del par de sujeción** aproximadamente para así ir seguro de que cumplirá y no haya problemas con el motor quedando un **par de carga de 1.3 Kg · cm**.

Para calcular la fuerza que tiene que tener la articulación y a raíz de eso calcular la reductora necesaria, se ha utilizado la siguiente fórmula genérica:

$$\text{Par motor} = \frac{\text{Fuerza motor (kg/cm)}}{\text{Distancia (cm)}} \quad (\text{Fórmula 2})$$

El siguiente paso sería saber la distancia a la que tendrá que estar el motor preparado para levantar el peso ya estimado anteriormente, pero en este caso no hay ninguna distancia ya que la fuerza en su mayor parte será más axial que radial y por lo tanto se procederá a poner una relación de reducción que quepa en el espacio disponible. Sabiendo esto, la reductora sería de una **relación de 3.86:1**. Esto hace que el par motor aumente 3.86 veces pasando a tener **5 Kg · cm**.

$$\text{Nuevo par motor} = 1.3\text{ Kg} \cdot \text{cm} \cdot 3.86 = 5\text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

Ahora se comprobará de si realmente esta reducción cumple con lo esperado debiendo de dar un **resultado igual o mayor al peso calculado** anteriormente.

Como podemos observar, efectivamente el nuevo par motor supera al peso estimado calculado anteriormente (**5kg > 1.5kg**), por lo que, poniendo esta relación de reducción, el motor no tendrá problema en mover la carga.

Para el diseño, se ha hecho uso de una herramienta que proporciona el número de planetas y número de dientes que debe de tener estos mediante la introducción de los dientes de la corona y del sol. La herramienta es la página web [3].

Como se muestra en la siguiente Figura 48, primeramente, hay que seleccionar el elemento fijo y el elemento impulsor que en mi caso el elemento fijo sería la corona y el impulsor el sol (en esa página web, el sol tiene como nombre planeta). Después de este paso, se introducen los dientes de la corona y el sol.

Diámetros primitivos	
	Corona: 40,00 mm
	Satélites: 13,00 mm
	Planeta: 14,00 mm
Satélites	
	Número de dientes de los satélites: 13
	Número óptimo de satélites: 3

Figura 48 Parámetros reductora articulación 6

Una vez teniendo claro la relación de reducción, procederemos al diseño. Hay que tener en cuenta algunos factores para el diseño:

Un planetario puede tener, como mínimo, dos planetas. El número máximo sólo está acotado por el espacio disponible alrededor del sol. Si se llevasen solo dos planetas, sería mucho más fácil que se desalinease el sistema, además de que el reparto de cargas es peor cuantos menos planetas se lleve. Cuatro o más planetas, sin embargo, el problema aparece por el espacio disponible, ya que los planetas corren mucho riesgo de colisionar entre ellos. Calculando el espacio del que se dispone, hay suficiente espacio para poner 3 planetas sin ningún problema.

Como son varios engranajes los que hay que diseñar, para simplificar y ahorrar tiempo, se va a utilizar la opción de “Administrar ecuaciones” que se trata de definir cotas mediante variables y funciones matemáticas para así cuando se tenga que diseñar otro engranaje o polea solo haría falta cambiar los parámetros necesarios

como el número de dientes y se genera automáticamente el nuevo diseño. Estos son los parámetros de los que dependen los engranajes:

- Módulo.
- Número de dientes.
- Angulo de diente.
- Ancho de diente.

Se ha elegido un diseño de engranaje con **dientes helicoidal** ya que estos ofrecen mejor rendimiento frente a los que tienen dientes rectos. Los dientes helicoidales, son más silenciosos y duraderos para aplicaciones de mucha carga ya que estos siempre tienen más de un diente en contacto.

Están también los engranajes que tienen doble helicoidal que tienen más ventajas y mejor rendimiento, pero el diseño se complica bastante en la parte del montaje ya que estos no se deslizarían como los helicoidales simples.

Para que los engranajes encajen totalmente, se ha ido variando ligeramente los parámetros del **módulo y ancho de diente**. El módulo no es recomendable modificarlo ya que este actúa como si fuera la escala de una pieza y este debe ser el mismo para todos los engranajes.

El diseño final de la articulación quedaría como se muestra en la vista explosionada de la Figura 49, usando tornillos **M2.5** y **M3** para el montaje junto a **rodamientos** de varios tamaños. También se ha hecho uso de tuercas de inserción en ciertas zonas debido a la falta de espacio.

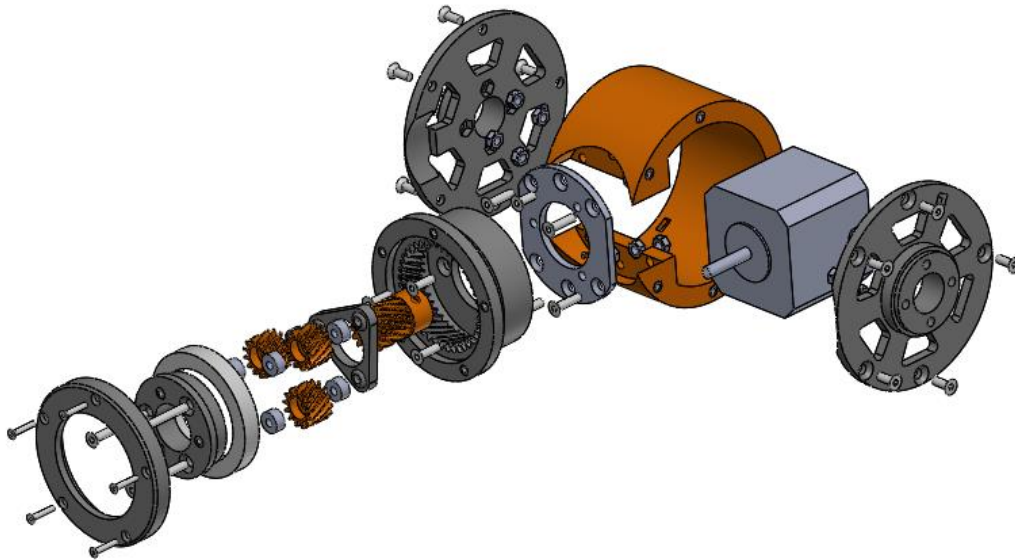


Figura 49 Vista explosionada articulación 6

5.2. Articulación 5

Para la articulación 5, se ha puesto un reductor planetario por falta de espacio también. Entonces para calcular la fuerza que tendrá la articulación y a raíz de eso calcular la relación de reductora necesaria se han seguido los mismos pasos de la reductora anterior.

Para el peso extra de seguridad se le ha añadido un **sobrepeso de 0.5Kg** ya que este no tendrá mucha carga.

Peso estructura anterior (Kg)	Peso de motor art. 6 (kg)	Peso de tornillos/ estructura art. 6 (kg)	Peso máximo carga (kg)	Marg en extra (kg)	Total (kg)
1.5	0.23	0.5	Está en el peso anterior	0.5	2.73

Tabla 17 Cálculo de peso de la articulación 5

Cabe destacar que, a parte de la relación de reducción del planetario también hay que añadirle la reducción de la correa de transmisión que sería de la polea del motor hasta la polea del eje de entrada del planetario (sol). Estas dos relaciones de

reducción (planetario+correa) se multiplicarían para darnos la relación de reducción total.

Viendo las características del motor de la Tabla 3, sabemos que el motor tiene un par de sujeción de 45N*cm por lo tanto convertimos dicho valor a Kg*cm con la fórmula vista anteriormente para facilitarnos los cálculos:

$$45\cancel{N} \cdot \cancel{cm} \cdot \frac{1 \text{ Kg}}{9.81 \cancel{N}} = 4.58 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

Hay que tener en cuenta que los 4.58 Kg · cm es el **par de sujeción y no el par de carga** por las razones que se explicaron anteriormente. Entonces para el “dimensionado”, se ha cogido que el **par de carga es un 50% del par de sujeción** aproximadamente para así ir seguro de que cumplirá y no haya problemas con el motor quedando un **par de carga de 2.4 Kg · cm**.

El siguiente paso es saber la distancia a la que tendrá que estar el motor preparado para levantar el peso ya estimado anteriormente. Para ello, debido al diseño esta **distancia es de 11cm** desde el punto central de la quinta articulación hasta el centro de la sexta articulación. Una vez sabiendo la distancia, faltaría aplicar la fórmula para calcular el peso que puede levantar el motor a una distancia de 11cm:

$$\frac{\text{Par motor (Kg} \cdot \text{cm)}}{\text{Distancia (cm)}} = \frac{2.4 \text{ Kg} \cdot \cancel{cm}}{11 \cancel{cm}} = 0.22 \text{ Kg}$$

El dato de 0.22 Kg · cm nos quiere decir que el motor a una distancia de 11cm solamente podrá levantar 220g. Para ello, hay que aumentar el par motor añadiendo una reductora. Sabiendo que la reducción total estará formada por el planetario más la reducción de la correa, esta se repartirá **entre los dos**. Según el espacio y el diseño del planetario, se le pondrá a este una **reducción de 5.5:1 y para la reducción de correa 2.5:1** quedando el total la multiplicación de ambos, siendo la relación de reducción total de **13.75:1**. Ahora se comprobará de si realmente esta reducción cumple con lo esperado debiendo de dar un **resultado igual o mayor al peso calculado** anteriormente.

$$\text{Nuevo par motor a los 6cm} = 0.22 \text{ Kg} \cdot 13.75 = 3 \text{ Kg}$$

Como se puede observar, efectivamente el nuevo par motor supera al peso estimado calculado anteriormente (**3kg > 2.73kg**), por lo que, poniendo esta relación de reducción, el motor no tendrá problema en levantar la carga.

Cálculo de la reductora						
Par motor (kg/cm)	Distancia (cm)	Kg/11 cm	Reductor planetario	Reductora correa	Total de la reducción	Par total a 11 cm (kg)
2.4	11	0.22	5.5	2.5	13.75	3

Tabla 18 Cálculo de la reductora de la articulación 5

Para el conocer el número de dientes de los engranajes se ha usado la herramienta de la página web igual que en caso anterior.

En este caso se han puesto solo 3 planetas con 21 diente cada uno como se observa en la Figura 50.

Diámetros primitivos

Corona: 54,00 mm
Satélites: 21,00 mm
Planeta: 12,00 mm

Satélites

Número de dientes de los satélites: 21
Número óptimo de satélites: 3

Figura 50 Parámetros reductora articulación 5

Después de calcular el número de dientes de cada engranaje, para el diseño se tendrían que modificar los parámetros del apartado de “Administrar ecuaciones” como en el caso anterior.

El diseño y ensamblaje de la reductora quedaría como se muestra en la vista explosionada de la Figura 51:

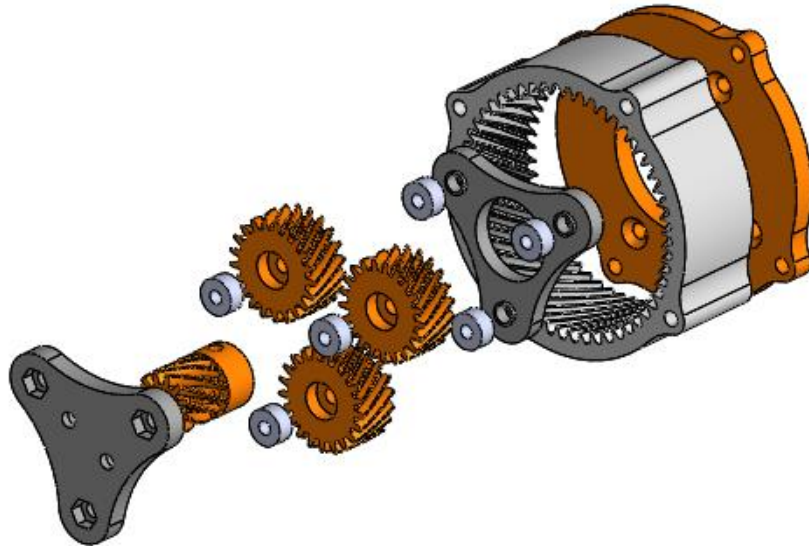


Figura 51 Vista explosionada de la reductora de la articulación 5

La reducción de polea en esta articulación se ha diseñado para **correas GT2** ya que, al no haber mucho peso, no habrá muchos problemas de sujeción.

El diseño final de la articulación quedaría como se muestra en la Figura 52. El montaje se ha hecho usando **tornillos M3 y varios rodamientos**.

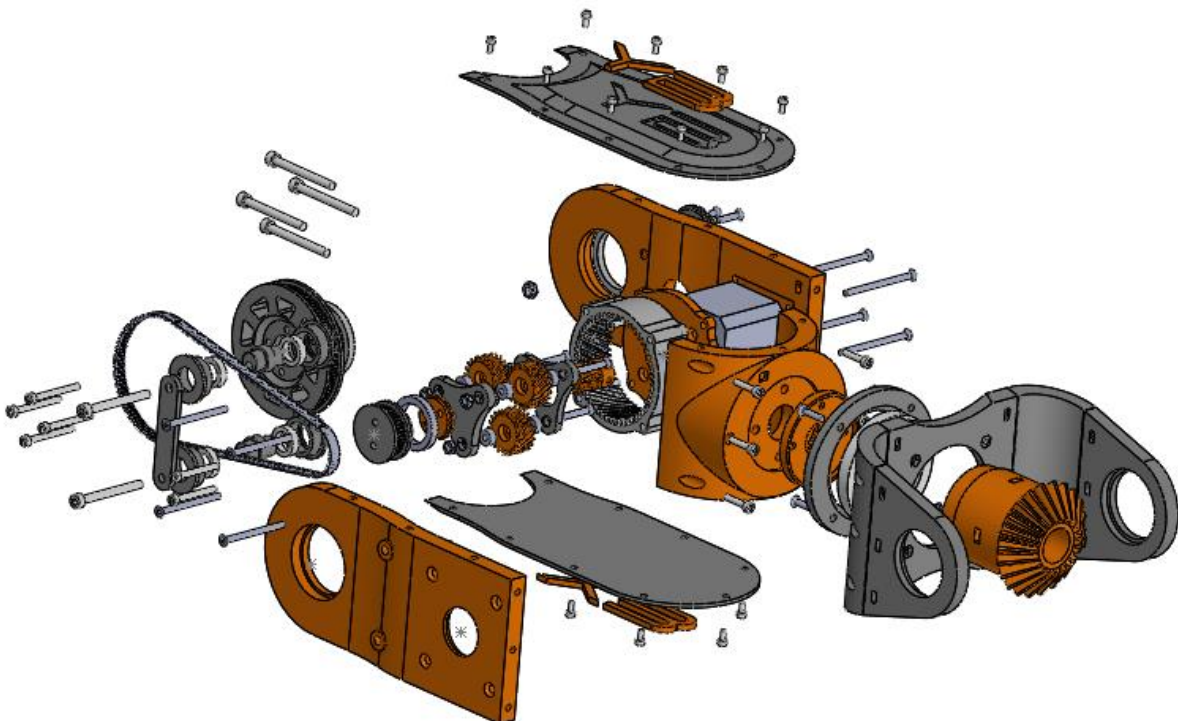


Figura 52 Vista explosionada articulación 5

Juntado la articulación 6 y la articulación 5, quedarían como se puede ver en la Figura 53.

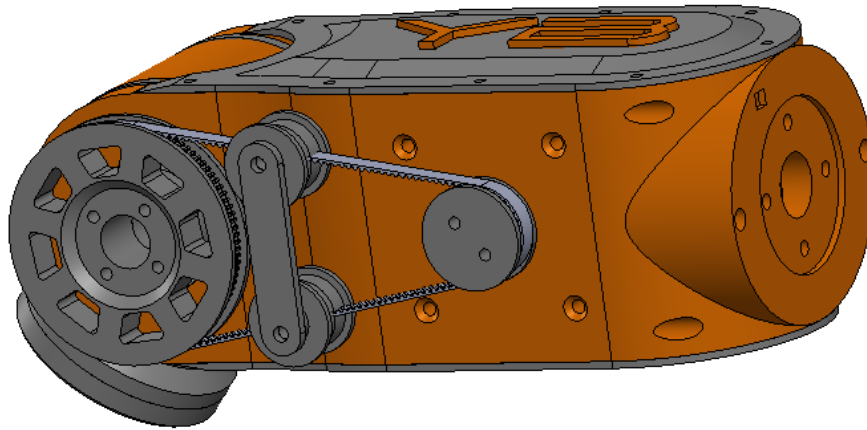


Figura 53 Montaje de la articulación 6 y 5

5.3. Articulación 3 y 4:

La articulación 3 y 4 son dos articulaciones que van juntas ya que los movimientos se hacen a través de un **sistema diferencial** por medio de dos motores. Este sistema nos ofrece la ventaja de que podemos mover la articulación (3 o 4) con la potencia de los dos motores, ya que en caso de que tengamos el diseño de cada articulación independiente, se tendrían que diseñar unas reductoras mayores para así poder realizar los movimientos correctamente.

Un sistema diferencial funciona de tal manera que cuando los dos motores giran en el mismo sentido, el **movimiento es circular** y cuando estos giran en sentidos contrarios el **movimiento es rotacional**. Cabe destacar que, si uno de los motores se bloquea o uno gira a una velocidad distinta al otro, estos dos movimientos se producirían simultáneamente.

Sabiendo esto, se ha decidido poner una **reductora de tipo planetario**.

Teniendo claro el tipo de reductora, se pasa a calcular el peso a la que estará sometida la articulación y a raíz de eso calcular la relación de reductora necesaria. Para ello, se han seguido los mismos pasos que las reductoras anteriores.

Para el peso extra de seguridad se le ha añadido un **sobrepeso de 1 Kg.**

Peso estructura anterior (Kg)	Peso de motor art. 5	Peso de tornillos/estructura art. 5 (kg)	Peso máximo carga (kg)	Margen extra (kg)	Total (kg)
2.73	0.28	0.5	<i>Está en el peso anterior</i>	1	4.43

Tabla 19 Cálculo de peso para la articulación 3/4

Hay que tener en cuenta que los **4.43 Kg son el total** y como son dos motores que controlan los movimientos, la carga se repartirá en ambos por lo que cada motor tendrá que ser capaz de levantar una fuerza de aproximadamente de **2.26 Kg** como mínimo.

Cabe destacar que, a parte de la relación de reducción del planetario hay que añadirle la reducción de la correa de transmisión que sería de la polea del motor hasta la polea del eje de entrada del planetario (sol). Estas dos relaciones de reducción (planetario+correa) se multiplicarían para darnos la relación de reducción total.

Viendo las características del motor de la Tabla 2, se sabe que el motor tiene un par de sujeción de 1.26N*m por lo tanto convertimos dicho valor a Kg*cm para facilitarnos los cálculos:

$$1.26 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \frac{1 \text{ Kg}}{9.81 \text{ N}} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = \mathbf{12.84 \text{ Kg} \cdot \text{cm}}$$

Hay que tener en cuenta que los 12.84 Kg · cm es el **par de sujeción y no el par de carga** por las razones que se explicaron anteriormente. Entonces para el “dimensionado”, se ha cogido que el **par de carga es un 35% del par de sujeción** aproximadamente para así ir seguro de que cumplirá y no haya problemas con el motor quedando un **par de carga de 4.5 Kg · cm**.

El siguiente paso es saber la distancia a la que tendrá que estar el motor preparado para levantar el peso ya estimado anteriormente. Para ello, debido al diseño esta **distancia es de 30cm** desde el punto central de la tercera/cuarta articulación hasta el extremo de la sexta articulación. Una vez sabiendo la distancia, faltaría aplicar la fórmula para calcular el peso que puede levantar el motor a una distancia de 30cm:

$$\frac{\text{Par motor (Kg} \cdot \text{cm)}}{\text{Distancia (cm)}} = \frac{4.5 \text{ Kg} \cdot \cancel{\text{cm}}}{30 \cancel{\text{ cm}}} = \mathbf{0.15 \text{ Kg}}$$

El dato de $0.15 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$ nos quiere decir que el motor a una distancia de 30cm solamente podrá levantar 150g. Para ello, hay que aumentar el par motor añadiendo una reductora. Sabiendo que la reducción total estará formada por el planetario más la reducción de la correa, esta se repartirá **entre los dos**. Según el espacio y el diseño del planetario, se le pondrá a este una **reducción de 5.14:1 y para la reducción de correa 3.5:1** quedando el total la multiplicación de ambos, siendo la relación de reducción total de **17.99:1**. Ahora se comprobará de si realmente esta reducción cumple con lo esperado debiendo de dar un **resultado igual o mayor al peso calculado** anteriormente.

$$\text{Nuevo par motor } \textit{cada} \text{ a los } 30\text{cm} = 0.15 \text{ Kg} \cdot 17.99 = \mathbf{2.7 \text{ Kg}}$$

$$\text{Par total de los dos motores} = 2.7 \text{ Kg} \cdot 2 = \mathbf{5.4 \text{ Kg}}$$

Como se puede observar, efectivamente el nuevo par motor supera al peso estimado calculado anteriormente (**5.4kg > 4.43kg**), por lo que, poniendo esta relación de reducción, el motor no tendrá problema en levantar la carga.

Cálculo de la reductora						
Par motor (kg/cm)	Distancia (cm)	Kg/30 cm	Reductor planetario	Reductora correa	Total de la reducción	Par total a 30 cm (kg)
4.5	30	0.150	5.14	3.5	17.99	2.7 *2=5.4

Tabla 20 Calculo de la reductora de la articulación 3/4

Para el conocer el número de dientes de los engranajes se ha usado la herramienta de la página web igual que en caso anterior.

En este caso se han puesto solo 4 planetas con 22 diente cada uno. En la siguiente Figura 54 se puede observar:

Diámetros primitivos

<i>Corona:</i> 58,00 mm
<i>Satélites:</i> 22,00 mm
<i>Planeta:</i> 14,00 mm

Satélites

<i>Número de dientes de los satélites:</i> 22
<i>Número óptimo de satélites:</i> 4

Figura 54 Parámetros reductora articulación 3/4

Después de calcular el número de dientes de cada engranaje, el diseño sería modificando los parámetro en el apartado de “Administrar ecuaciones” como en el caso anterior.

El diseño y ensamblaje final quedaría como se muestra en la vista explosionada de la Figura 55. Hay que destacar que en el engranaje “sol” que sería el eje de entrada del planetario, se le han colocado dos rodamientos a cada extremo ya que es estará sometido a una tensión por la correa del motor y gracias a esos rodamientos se quedará lo más centrado posible evitando así rozamientos y desgastes.

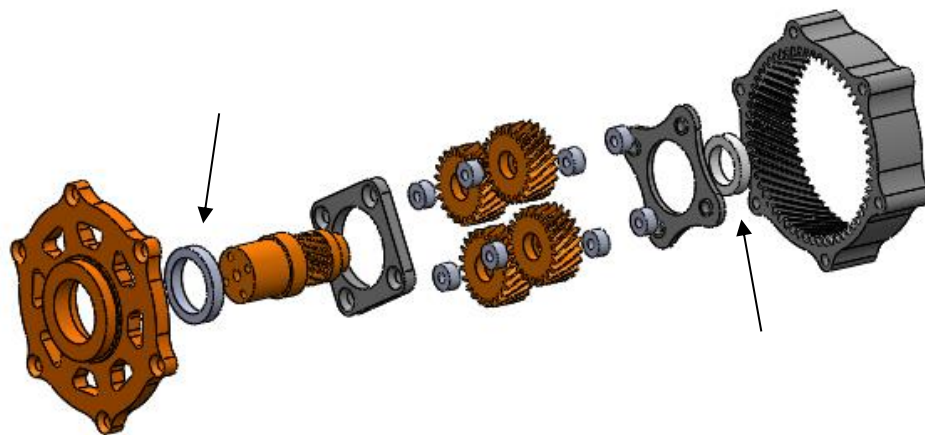


Figura 55 Vista explosionada de la reductora de la articulación 3/4

Para la transmisión del movimiento desde el motor hasta el eje de entrada del cicloidal se ha hecho uso de las **correas GT3** ya que usando las correas GT2 no se sostenían bien los dientes y resbalaba. Esto se debe a las tolerancias de la impresora haciendo que los mecanismos no suelen encajar a la perfección.

Para el diseño de las poleas GT3, como son varias las que hay que diseñar, para simplificar y ahorrar tiempo, se va a utilizar la opción de “Administrar ecuaciones” igual que para el diseño de los engranajes planetarios. Los parámetros de los que depende el diseño son los siguientes:

- Número de dientes.
- Paso de dientes.
- Diámetro de la polea.
- Ángulo de diente.
- Altura de diente.
- R1, R2, R3

En la Figura 56 se puede observar la vista explosionada de todo el conjunto de la articulación 3 y 4. Para el montaje, principalmente se han hecho uso de **tornillos M3** de diferentes longitudes y **rodamientos** de diferentes tamaños para obtener un movimiento suave.

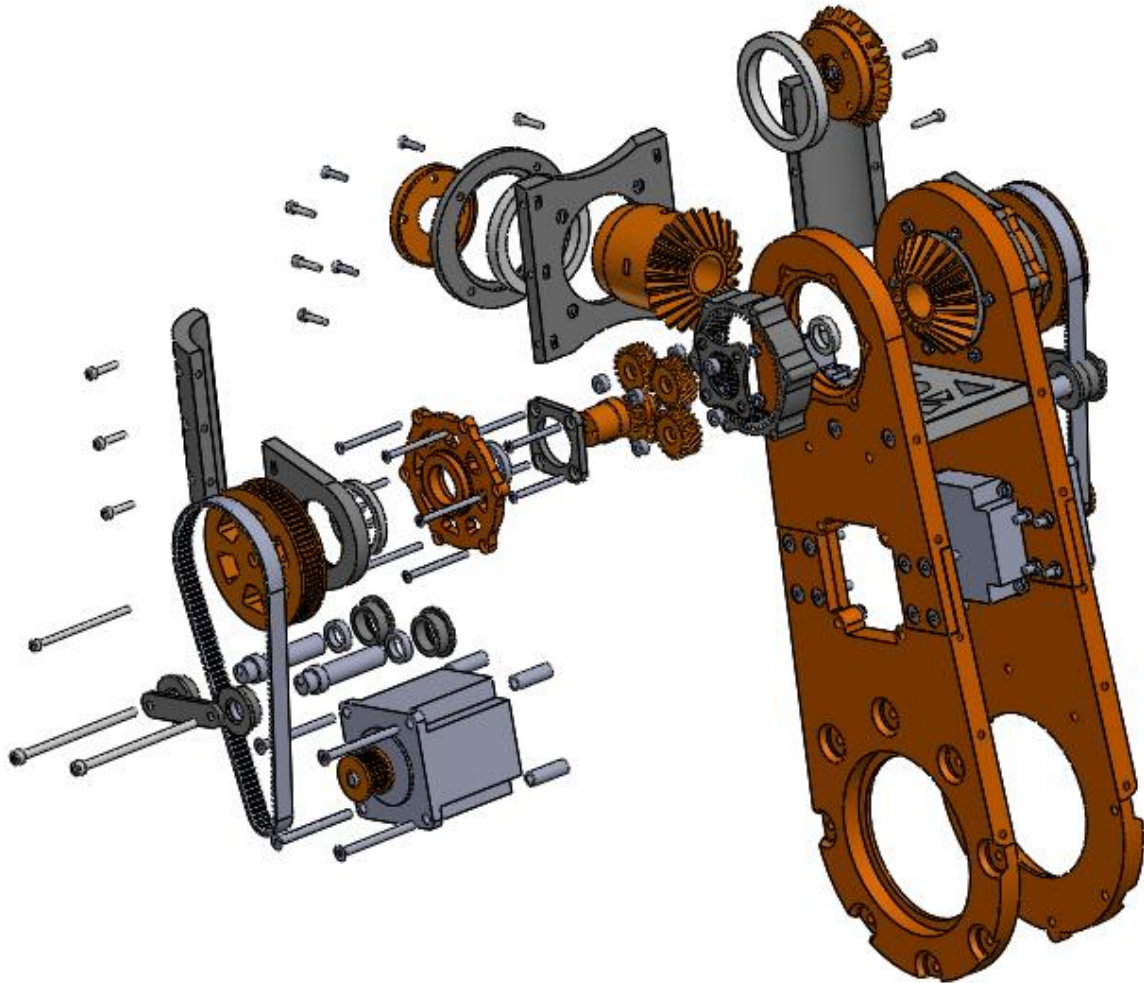


Figura 56 Vista explosionada de la articulación 3/4

Para una mejor presentación y por precaución, se ha diseñado un “pasa cables” como se observa en la Figura 57 con la finalidad de ser una guía de los cables en el diferencial ya que es probable que estos se enreden con los engranajes y se rompan. La pieza esta se imprimirá con filamento flexible para que la articulación tenga un movimiento libre.



Figura 57 Guía para los cables

En la Figura 58 se puede observar el montaje de las articulaciones 6, 5 y 3/4.

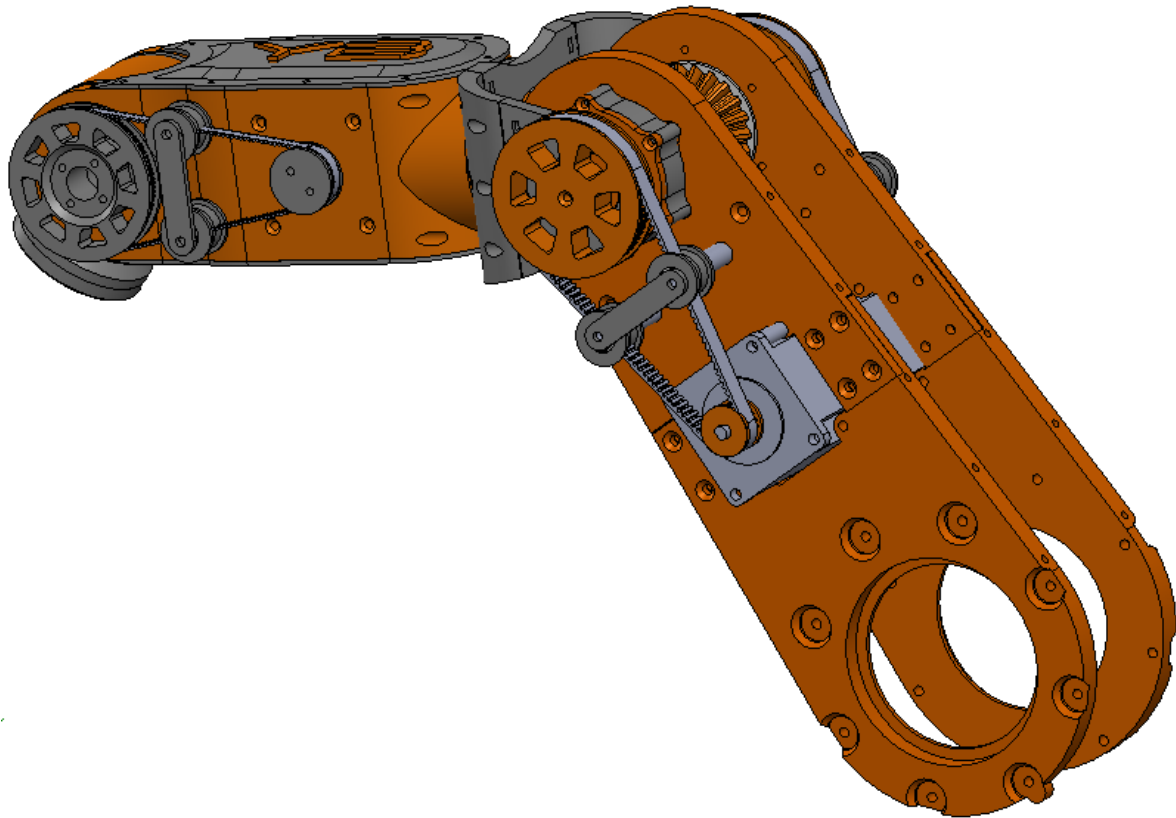


Figura 58 Montaje de las articulaciones 6, 5 y 3/4

5.4. Articulación 2

Se continuará diseñando la estructura de la segunda articulación y ya más adelante se procederá al diseño de la reductora que para cambiar de tipo se pondrá una **reductora cicloidal**.

Esta articulación es la más importante ya que sobre ella incide todo el peso del brazo por lo que debe de tener una estructura rígida. Para ello, se empezará con el diseño del soporte el cual se acoplará a la primera articulación. El soporte consta de dos lados con una saliente donde irán los rodamientos. Cabe destacar que en los salientes se ha hecho un borde de 1mm para que los rodamientos no tengan rozaduras tal y como se aprecia en la Figura 59:

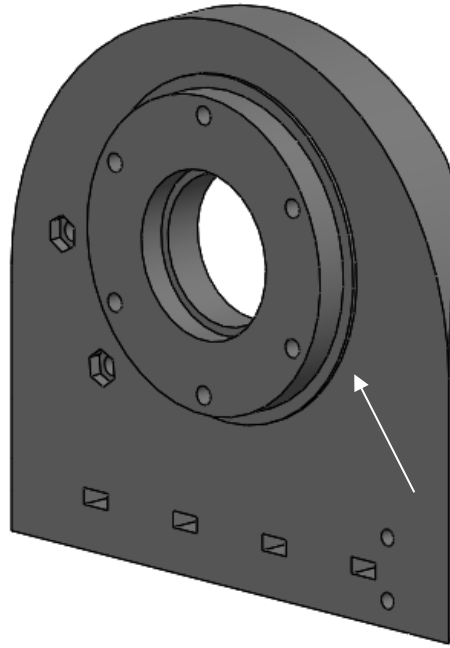


Figura 59 Soporte lateral de la articulación 2

Para el diseño de la estructura móvil, se han hecho dos superficies planas que se atornillan por el medio como se muestra en la Figura 60, siendo esta una pieza muy grande que no cabía en la cama de la impresora 3D y en medio se ha puesto el hueco para los dos motores de la siguiente articulación. La razón por la que se han situado los motores en medio, es que en cuanto más cerca estaban del punto de donde se produce el movimiento, menos fuerza habría que aplicar el motor ya que así habrá menos peso alejado de dicho punto.



Figura 60 Estructura de la articulación 2

Para el diseño de la reductora de la articulación 2 hay que tener en cuenta que es una de las articulaciones que más par necesita ya que de él depende todo el brazo robótico. Debido a esto se ha decidido de poner una **reductora de tipo cicloidal** ya que una reductora de tipo planetario no es la más adecuada por la tensión a la estará sometida y la cantidad de dientes que conlleva siendo estos de plástico, pero antes hay que tener en cuenta muchos factores como el peso que tiene que ser capaz de mover la articulación y el espacio disponible para la reductora entre otros.

Como en los casos anteriores, primero empezaremos calculando el peso que tendrá que soportar la articulación. Y ya a raíz de ese peso calcular la relación de reductora necesaria. Para más seguridad se le ha añadido un **sobrepeso de 1.5 Kg** para así el robot vaya sobrado de fuerza y no haya ningún problema de pérdida de pasos.

Peso estructura anterior (Kg)	Peso de motor art. 3/4	Peso de tornillos/estructura art. 3/4 y art. 2 (kg)	Peso máximo carga (kg)	Margen extra (kg)	Total (kg)
4.43	0.7*2	1	<i>Está en el peso anterior</i>	1.5	8.33

Tabla 21 Cálculo del peso de la articulación 2

Sabiendo ya el peso que tendrá que ser capaz de levantar la articulación 2, cabe destacar que, como los casos anteriores, a parte de la relación de reducción del cicloidal, hay que añadirle la reducción de la correa de transmisión que sería de la polea del motor hasta la polea del eje de entrada del cicloidal. Estas dos relaciones de reducción (cicloidal+correa) se multiplicarían para darnos la relación de reducción total.

Viendo las características del motor de la Tabla 1, sabemos que el motor tiene un par de sujeción de 2.4N*m por lo tanto convertimos dicho valor a Kg*cm para facilitarnos los cálculos:

$$2.4 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \frac{1 \text{ Kg}}{9.81 \text{ N}} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = 24.46 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

Hay que tener en cuenta que los 24.46 Kg · cm es el **par de sujeción y no el par de carga** por las razones que se explicaron anteriormente. Entonces para el “dimensionado”, se ha cogido que el **par de carga es un 40% del par de sujeción** aproximadamente para así ir seguro de que cumplirá y no haya problemas con el motor quedando un **par de carga de 9 Kg · cm**.

El siguiente paso es saber la distancia a la que tendrá que estar el motor preparado para levantar el peso ya estimado anteriormente. Para ello se ha elegido una **distancia de 56cm** desde el punto central de la segunda articulación hasta el extremo de la última articulación. Una vez sabiendo la distancia ya que aplicar la fórmula para calcular el peso que puede levantar el motor a una distancia de 56cm:

$$\frac{\text{Par motor (Kg} \cdot \text{cm)}}{\text{Distancia (cm)}} = \frac{9 \text{ Kg} \cdot \text{cm}}{56 \text{ cm}} = 0.16 \text{ Kg}$$

El dato de 0.16 Kg · cm nos quiere decir que el motor a una distancia de 56cm solamente podrá levantar 160g. Para ello, hay que aumentar el par motor añadiendo una reductora. Sabiendo que la reducción total estará formada por el cicloidal más la

reducción de la correa, esta se repartirá **entre los dos**. Según el espacio y el diseño del cicloidal, se le pondrá a este una reducción de 20:1 y para la reducción de correa 2.8:1 quedando el total la multiplicación de ambos, siendo la relación de reducción total de **56:1**. Ahora se comprobará de si realmente esta reducción cumple con lo esperado:

$$\text{Nuevo par motor a los 56cm} = 0.16 \text{ Kg} \cdot 56 = \mathbf{9 \text{ Kg}}$$

Como podemos observar, el nuevo par motor supera al peso estimado calculado anteriormente (**9kg > 8.33kg**), por lo que, poniendo esta relación de reducción, el motor no tendrá problema en levantar la carga.

Cálculo de la relación de la reductora						
Par motor (kg*cm)	Distancia (cm)	9Kg*cm/56 cm (Kg)	Reductora cicloidal	Reductor a correa	Total de la reducción	Par total a 56 cm (kg)
9	56	0.16	20	2.8	56	9

Tabla 22 Cálculo de la relación de reducción de la articulación 2

Una vez teniendo claro la relación de reducción, se procederá a diseñar el cicloidal. Hay que tener en cuenta los siguientes parámetros para el diseño de los discos:

N = Número de pines (Number of rollers)

Rr = Radio de los pines (Radius of the roller)

R = Radio del circulo que forman los pines (Radius of the rollers pitch circle diameter))

E = E<Rr; Excentricidad (Eccentricity - offset of input shaft to a cycloidal disk)

Sustituyendo los parámetros quedaría:

$$\mathbf{N = 20}$$

$$\mathbf{Rr = 5mm/2 = 2.5mm}$$

$$\mathbf{R = 40mm}$$

$$\mathbf{E < Rr; E = 2mm}$$

Después de sustituir los parámetros, ya podemos hacer el diseño en el programa de diseño. Hay varias formas de diseñar el disco con los lóbulos, pero para facilitar el mismo, se puede hacer usando la función de “**Curva conducida por ecuación**” en SOLIDWORKS. Gracias a “Omar Younis” [4], una persona que compartió las fórmulas obtenidas juntando todos los parámetros mencionados anteriormente en las dos ecuaciones de a continuación:

$$X = R \cdot \cos(t) - (R_r \cdot \cos(t + \arctan\left(\frac{\sin((1-N) \cdot t)}{\frac{R}{EN} - \cos((1-N) \cdot t)}\right)) - E \cdot \cos(N \cdot t)$$

(Fórmula 3)

$$Y = -R \cdot \sin(t) + (R_r \cdot \sin(t + \arctan\left(\frac{\sin((1-N) \cdot t)}{\frac{R}{EN} - \cos((1-N) \cdot t)}\right)) + E \cdot \sin(N \cdot t)$$

(Fórmula 4)

A continuación, se procederá a demostrar cómo se ha hecho diseño en SOLIDWORKS.

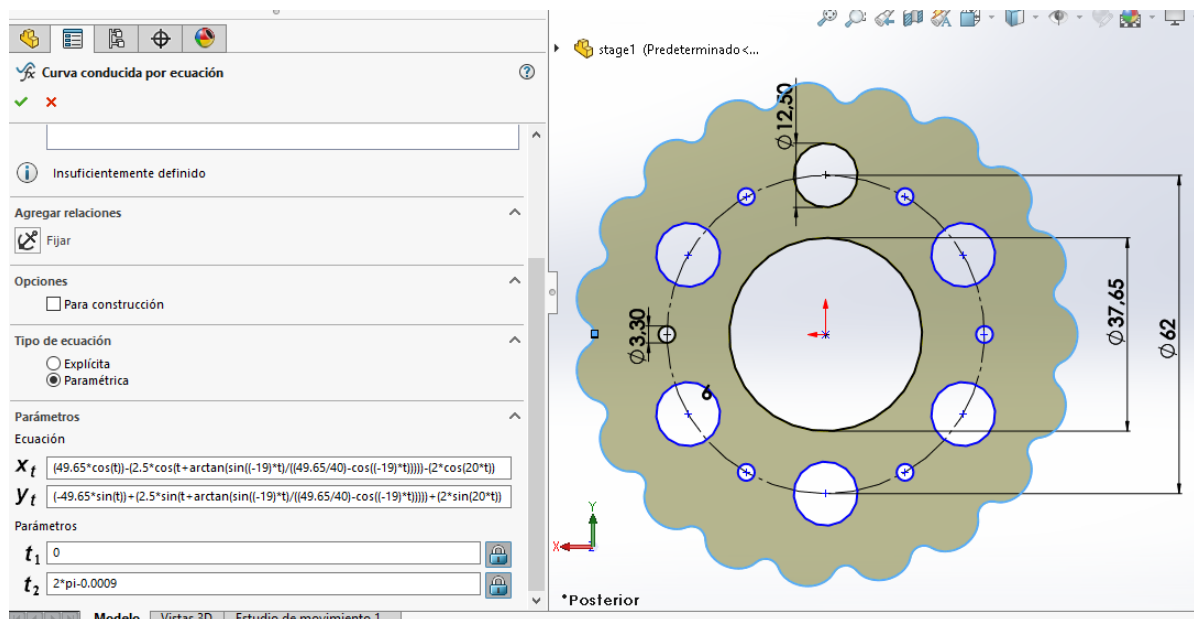


Figura 61 Diseño del cicloidal

Los demás círculos que se observan en la Figura 61 son para rodamientos tanto el céntrico como los del alrededor, siendo este último los rodamientos donde irán los ejes de salida de la reducción, pero en mi caso, la configuración cambia y estos ejes se fijarían para tener una salida en la corona externa siendo esta la segunda articulación.

En la siguiente Figura 62 se ve una vista explosionada del diseño:

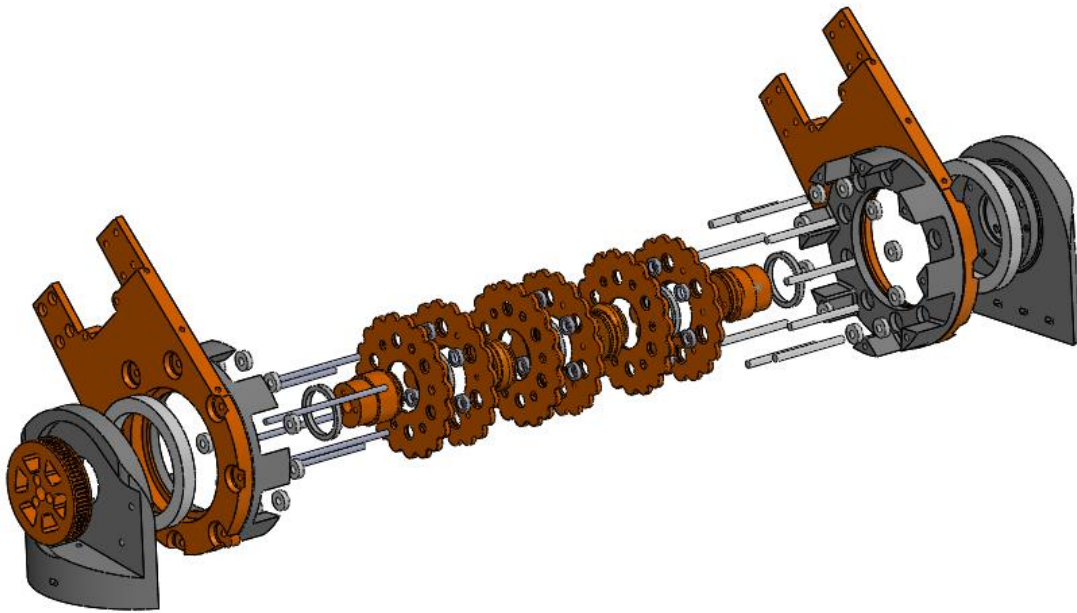


Figura 62 Vista explosionada de la reductora de la articulación 2

Respecto al número de discos del cicloidal, se optado por poner **3 discos desfasados 120°** para compensar las fuerzas de desequilibrio causadas por el movimiento excéntrico y proporcionar un funcionamiento más suave a velocidades más altas. El número de discos no tiene nada que ver con la relación de reducción.

Para la transmisión del movimiento desde el motor hasta el eje de entrada del cicloidal se ha hecho uso de la **correa tipo GT3** cuyo diseño es igual que en el caso anterior.

Para el diseño de los tensores de la correa, se ha diseñado un cilindro con unos rodamientos por medio y un agujero excéntrico para que así según cuanto se giren los cilindros habrá más tensión o no. En la siguiente Figura 63 se muestra como ha quedado.

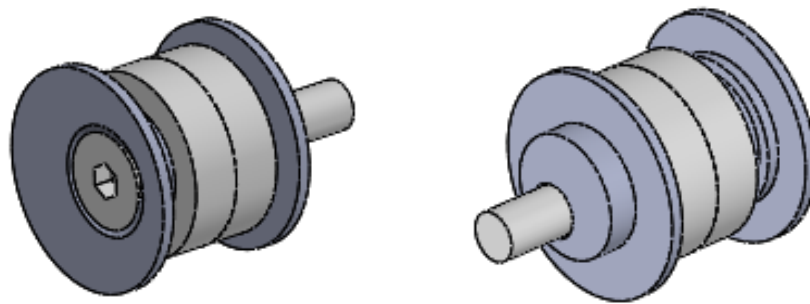


Figura 63 Tensor correa articulación 2

En la

Figura 64 se puede observar la vista explosionada completa de la segunda articulación.

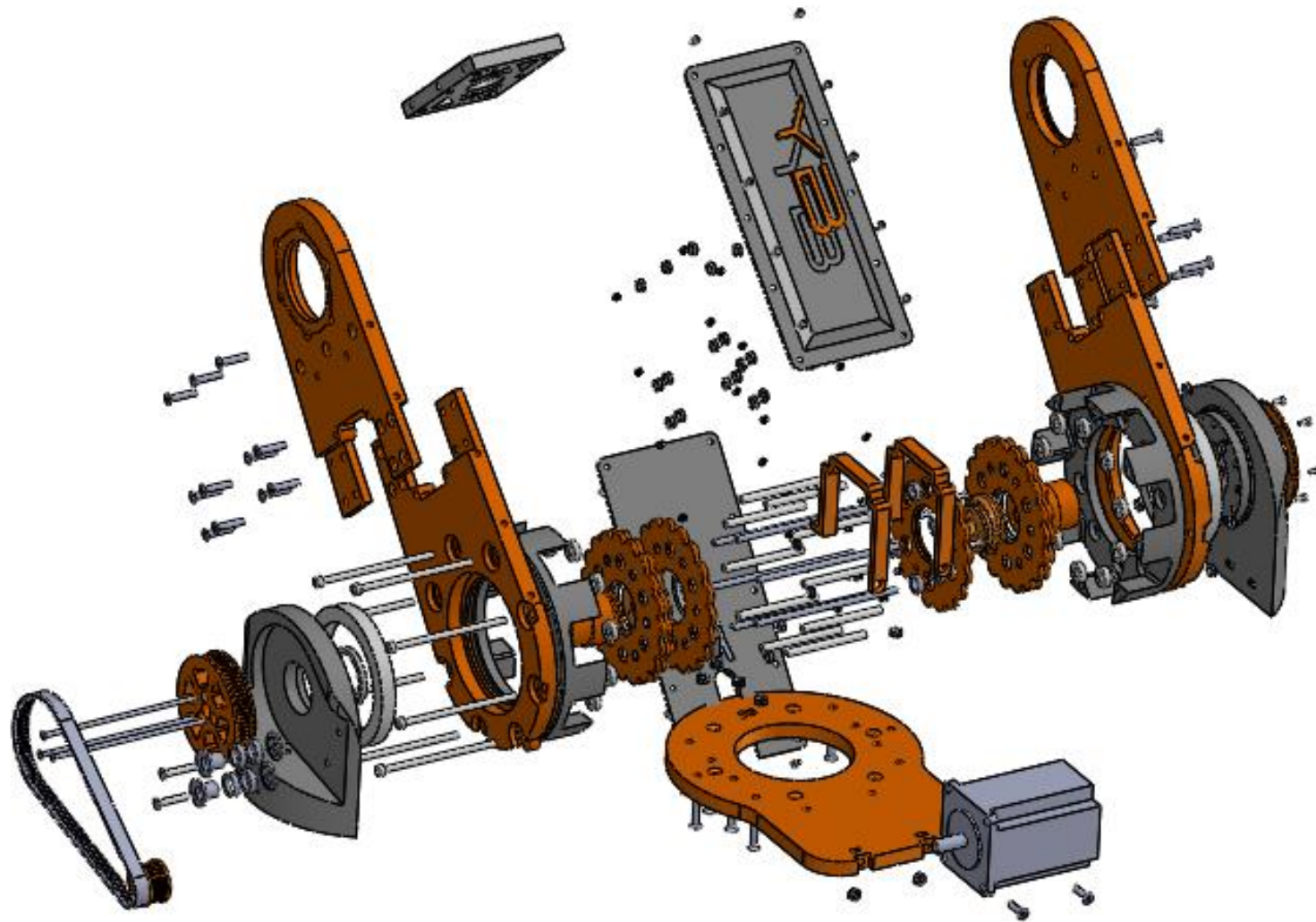


Figura 64 Vista explosionada de la articulación

A continuación, en la Figura 65 podemos ver el montaje de las articulaciones 6, 5, 3/4 y 2.

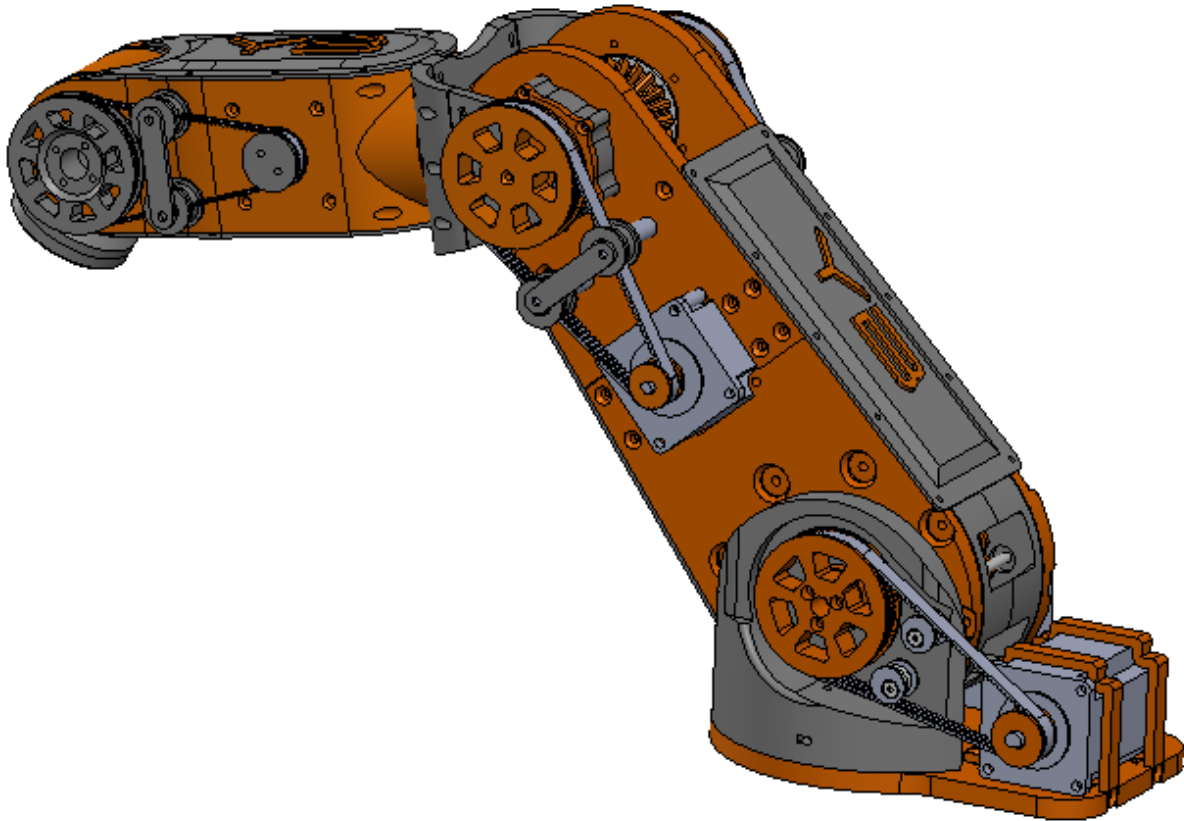


Figura 65 Montaje de las articulaciones 6, 5, 3/4 y 2

5.5. Articulación 1

Ya nos faltaría el diseño de la articulación 1, lo que viene siendo la base giratoria. En este caso, con una simple reductora de engranajes y una correa para transmisión será suficiente ya que mayoritariamente hay fuerzas axiales despreciando las radiales. Por lo tanto, la polea dentada del motor tendrá 20 dientes y 160 dientes para la base giratoria. Sabiendo esto, para obtener la relación de reducción dividimos los dientes de la polea de salida entre los dientes de la polea del motor:

$$\frac{160}{20} = 8$$

por lo tanto, la **relación de reducción** será de **8:1**.

En esta articulación se ha necesitado de un rodamiento grande de aproximadamente 127mm de diámetro interior y 135mm de diámetro exterior para la suavidad y fluidez en el movimiento. Este último, su coste era elevado y hacía que el

proyecto encareciera significativamente. Para remplazarlo, Como se aprecia en la Figura 66 se ha tenido que fabricar un rodamiento grande poniendo una serie de **bolas de 8mm** alrededor de una guía con un vacío circular tanto en la parte superior como inferior dejando un **espacio entre ellos de 1mm** para que no haya fricción entre la parte fija y la parte móvil. Para cerrarlo ya si se ha usado un rodamiento comercial más pequeño que tensa la parte superior hacia abajo utilizando por medio unos espaciadores para no deformar la parte superior. Para mantener la separación de las bolas cuando gira la base, se ha diseñado una “rejilla” de 0.5mm de grosor.

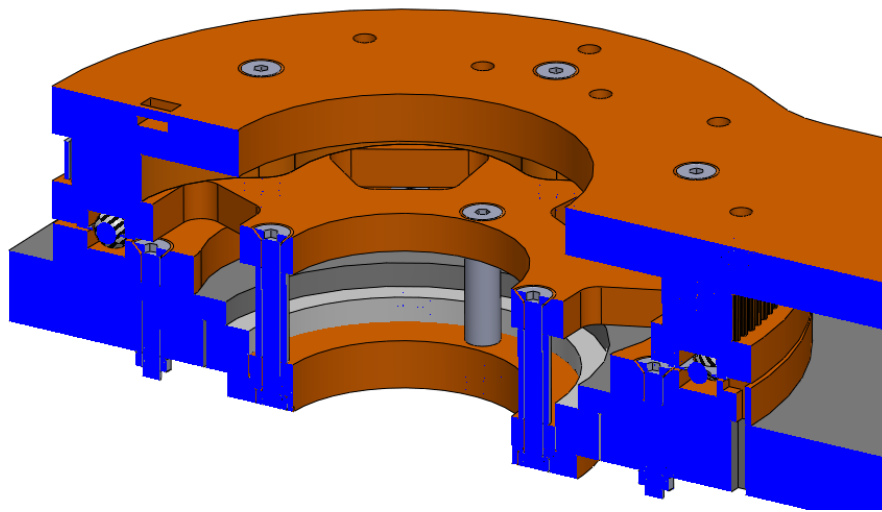


Figura 66 Vista seccionada de la articulación 1

Se ha tenido en cuenta de que hay piezas que no hace falta que estén totalmente “rellenas” y por lo tanto se han diseñado unos huecos en forma de trapecio por medio para así ahorrar plástico en ciertas zonas siempre y cuando no afecten a la funcionalidad de la pieza. A continuación, en la Figura 67 se muestran unos ejemplos:

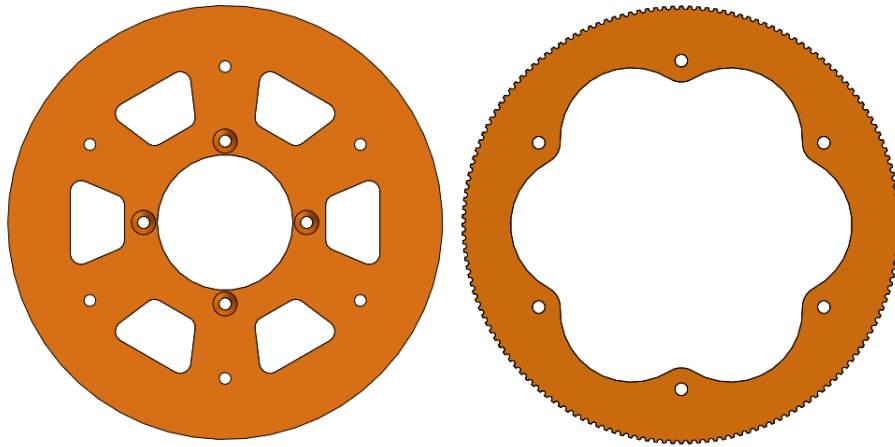


Figura 67 Diseño piezas articulación 1

Se puede observar en la Figura 68 un pequeño hueco donde irá incrustado el sensor magnético que no permitirá saber la posición 0 de la articulación. En la parte superior que gira, irá un pequeño **imán de 5x1mm** que cambiará el estado del sensor magnético cuando estos se alineen.

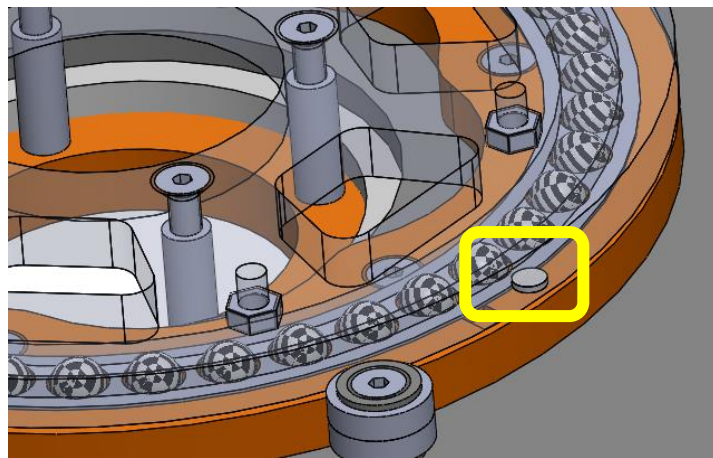


Figura 68 Sensor magnético articulación 1

Se ha añadido a la superficie también un soporte para un piloto de señalización que nos indicará el estado en el que se encuentra el brazo. Para el ensamblaje del conjunto de piezas se han utilizado principalmente **tornillos de M4** con cabeza avellanada con sus respectivas tuercas. Para las tuercas, se han puesto unos huecos hexagonales donde estos encajan a medida dando la posibilidad de apretar sin problema. El resultado final quedaría como se muestra en la siguiente Figura 69 teniendo un giro libre la base.

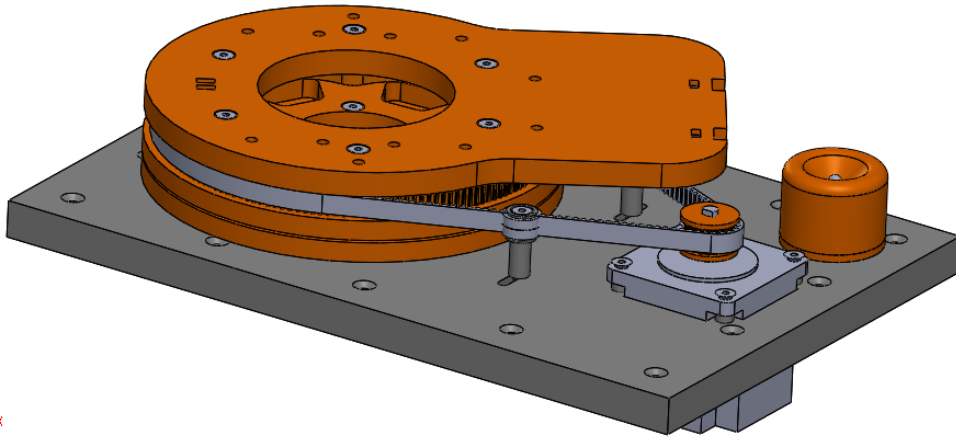


Figura 69 Ensamblaje articulación 1

En la Figura 70 se muestra una vista explosionada de como quedaría todo el ensamblaje:

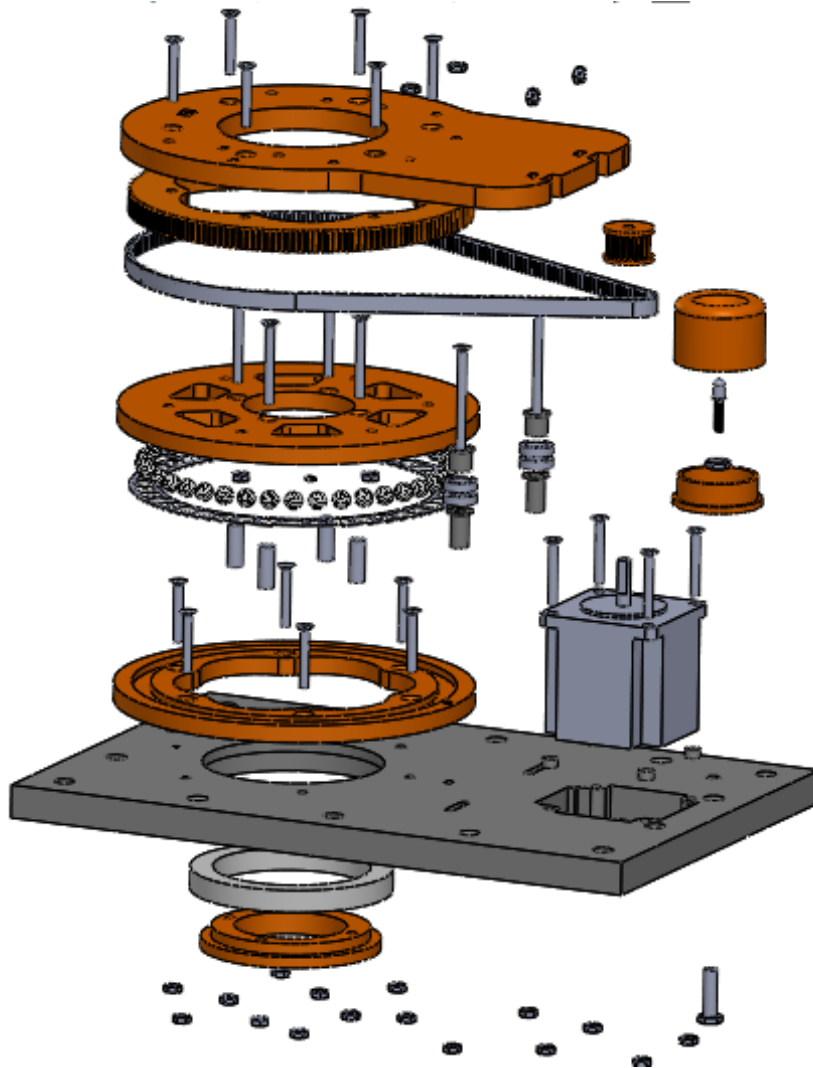


Figura 70 Vista explosionada de la articulación 1

En la Figura 71, podemos observar el conjunto de todas las articulaciones.

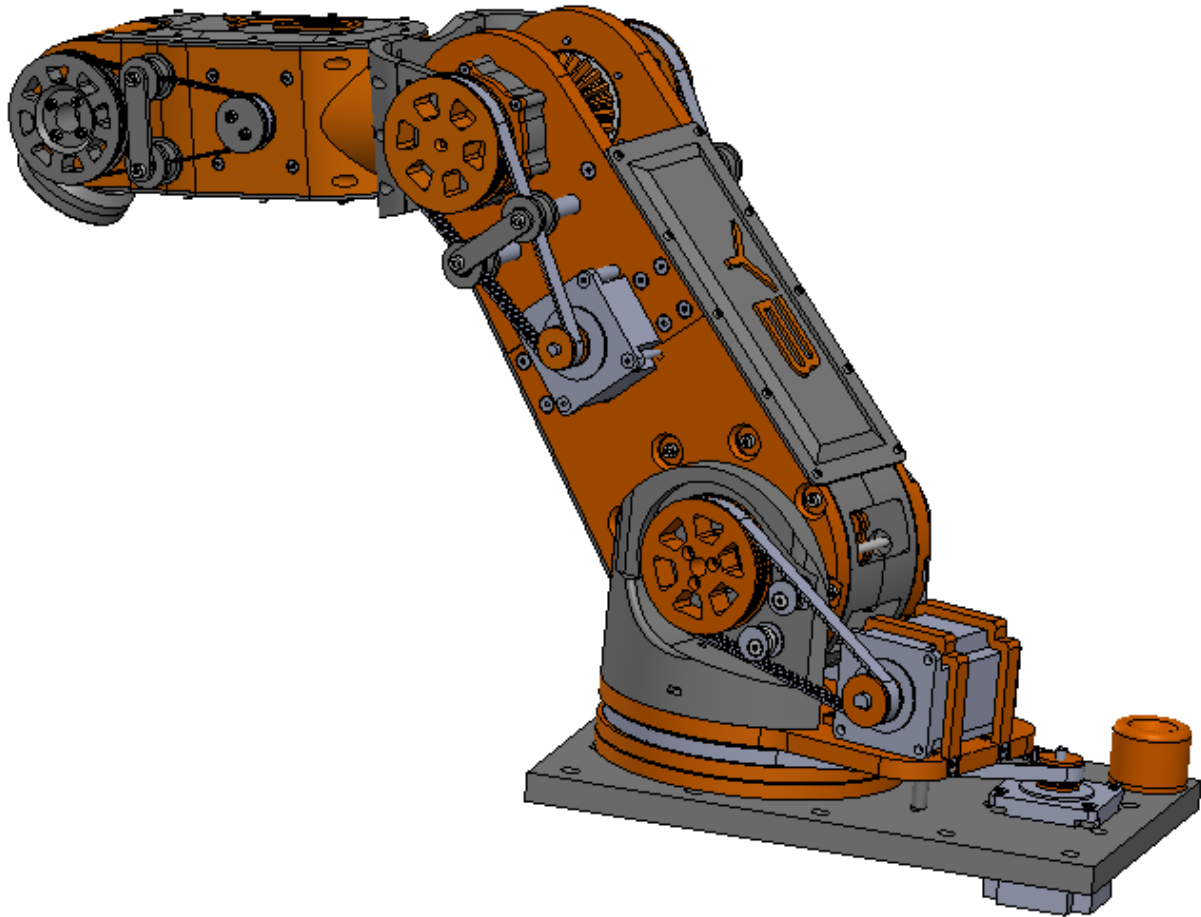


Figura 71 Montaje de todas las articulaciones

5.6. Base para los componentes electrónicos

Después de diseñar todas las articulaciones del brazo, se pasará a la parte de la base que dará estabilidad al brazo y también donde irán alojado el cableado de todos los componentes electrónicos. Había la posibilidad de poner el brazo aparte e ir conectando la base de control con el brazo mediante cables, pero esta no es una buena solución ya que hay más probabilidad de que falle algo teniendo muchos cables por medio. En esta misma base estará:

- La seta de emergencia.
- El conector de corriente 220v.
- El interruptor de encendido de la alimentación del brazo.
- El conector del cable de la pantalla.
- El conector USB del Arduino.
- Conector para alimentación externa de 12v y 24v de hasta 1A.
- Conector para entradas y salidas incluyendo unas bornas de 5v a 1A.

- Conector de dos relés internos cableados de 8A.

El diseño de esta base se hará en el mismo programa de SOLIDWORKS, pero no se imprimirá en 3D ya que esto requerirá de mucho plástico aparte de que se necesita una cama más grande por las dimensiones que tendrá la base. Por lo tanto, se ha optado por hacerla con **madera de 6mm de grosor para los lados y 18mm de grosor para la parte superior e inferior** como en la Figura 72 y luego “forrándolos” con pegatina con acabado de fibra de carbono. Para el corte y fresado de esta se utilizará una **CNC**.

Para el montaje de cada parte de la base, se han diseñado unas piezas en forma de esquinas como los de la Figura 73 que se imprimirán y se colocarán en los bordes uniéndolo y cerrando toda la “caja”.

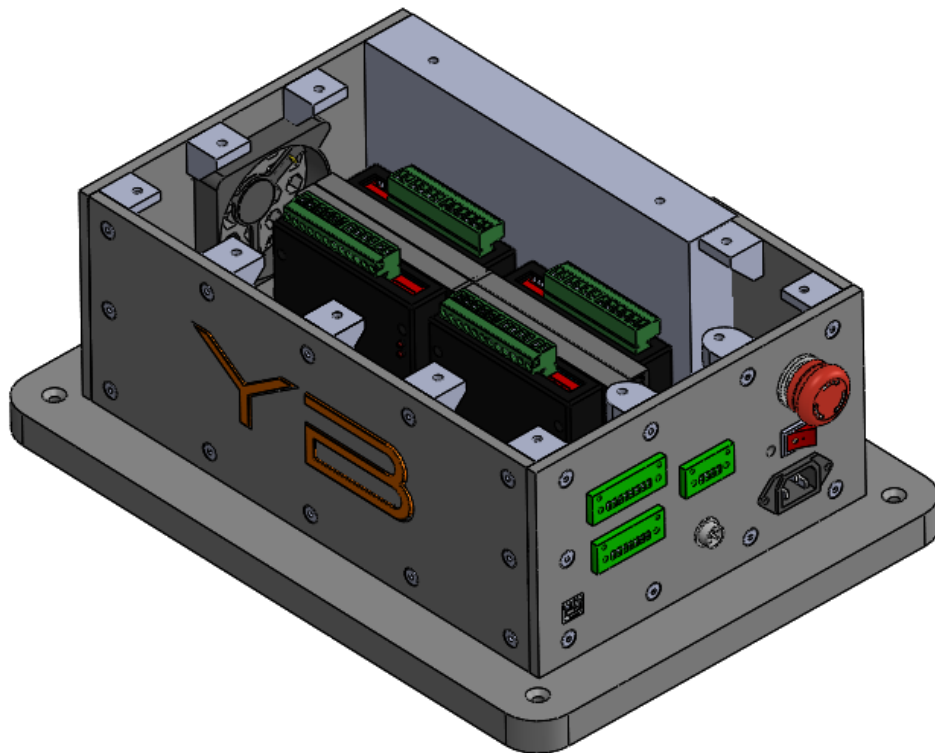


Figura 72 Base para los componentes electrónicos 1

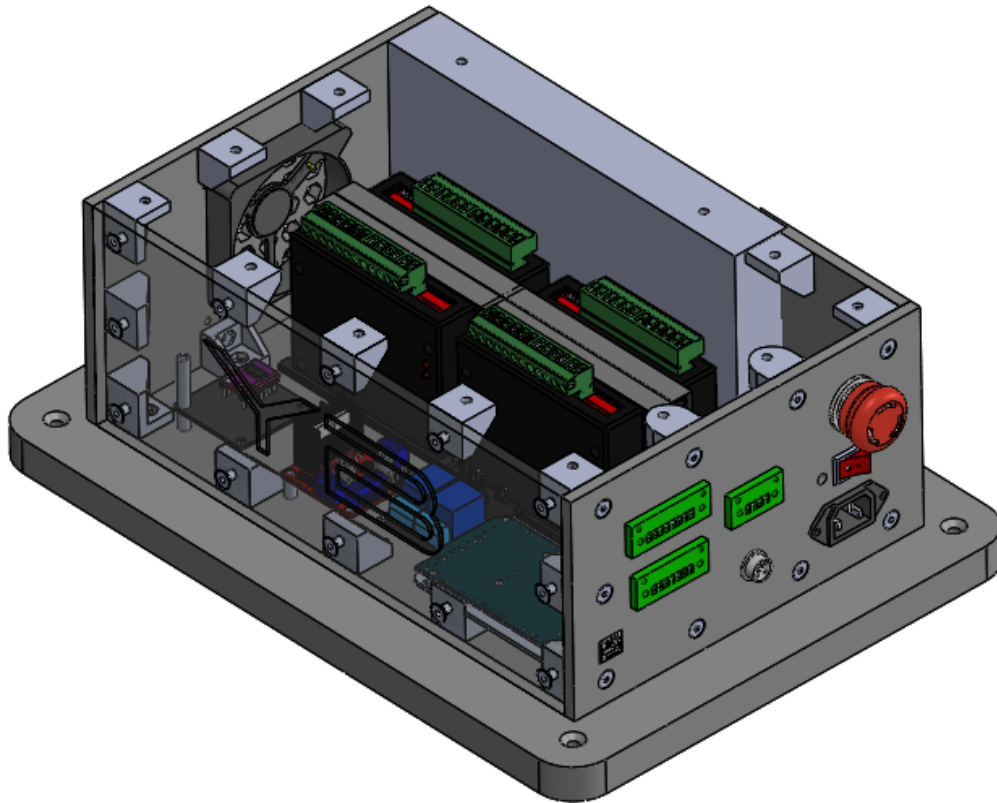


Figura 73 Base para los componentes electrónicos 1.1

El diseño de SOLIDWORKS nos ha ayudado a la disposición de cada componente quedando esta como se muestra en la Figura 74

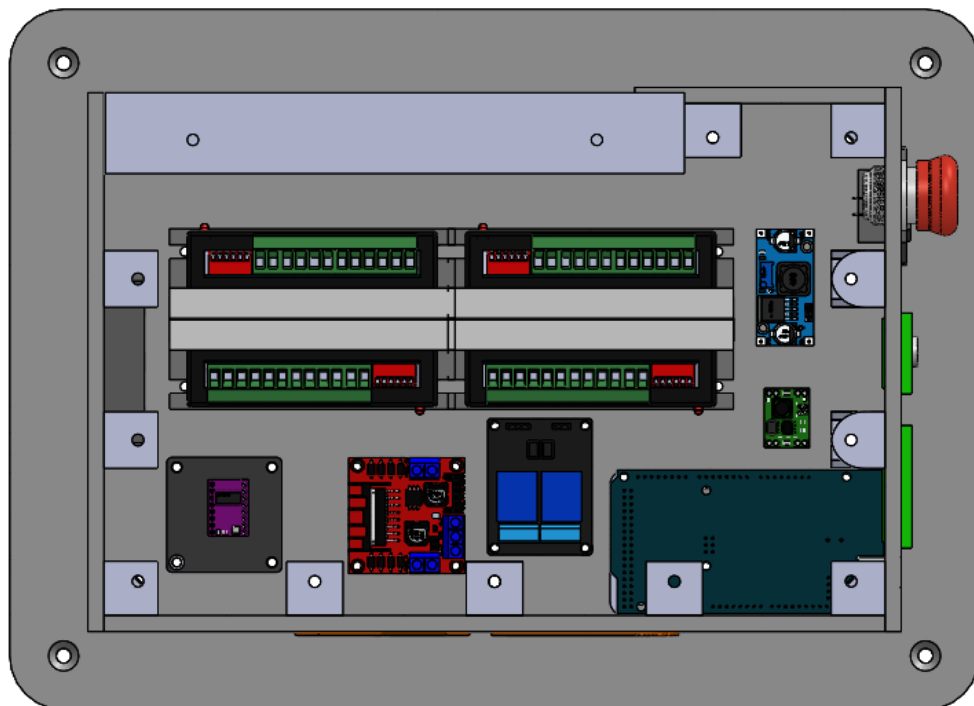


Figura 74 Base para los componentes electrónicos 1.2

A esta base se le han añadido unas **extremidades o brazos** con el fin de ayudar al brazo a tener más estabilidad sobre una superficie plana tal y como se muestra en la Figura 75. Además de estas extremidades se han colocado por debajo unos “**tacos**” diseñados e imprimidos con material flexible con la finalidad de evitar deslizamientos.

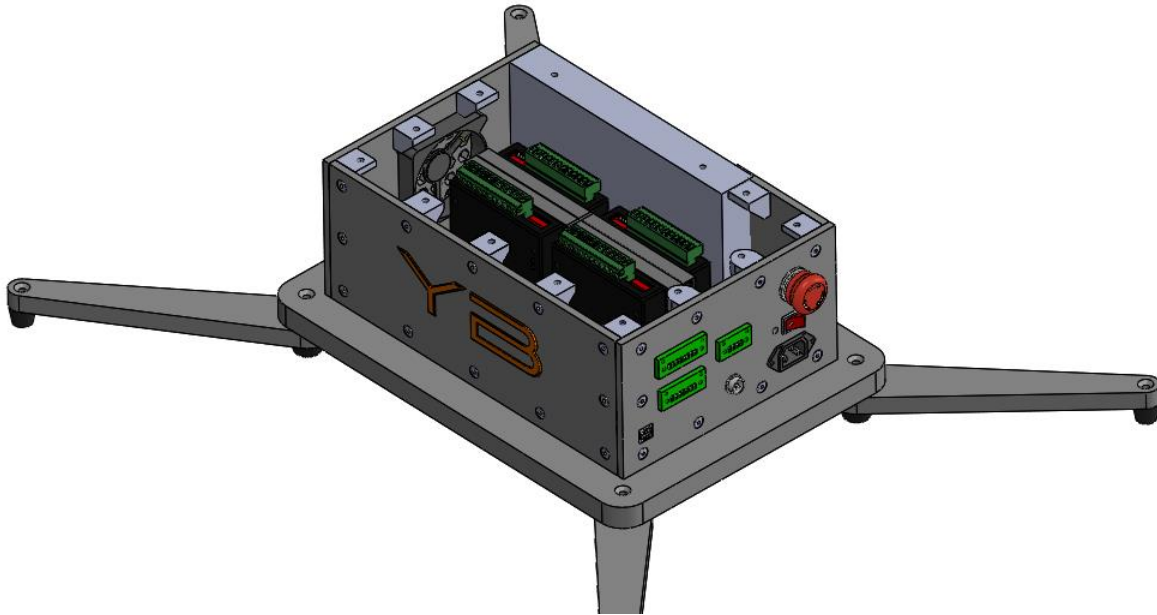


Figura 75 Extremidades base para los componentes electrónicos

Después del diseño de todo el brazo robótico, el conjunto de todas las articulaciones y la base quedaría como se muestra en la Figura 76.

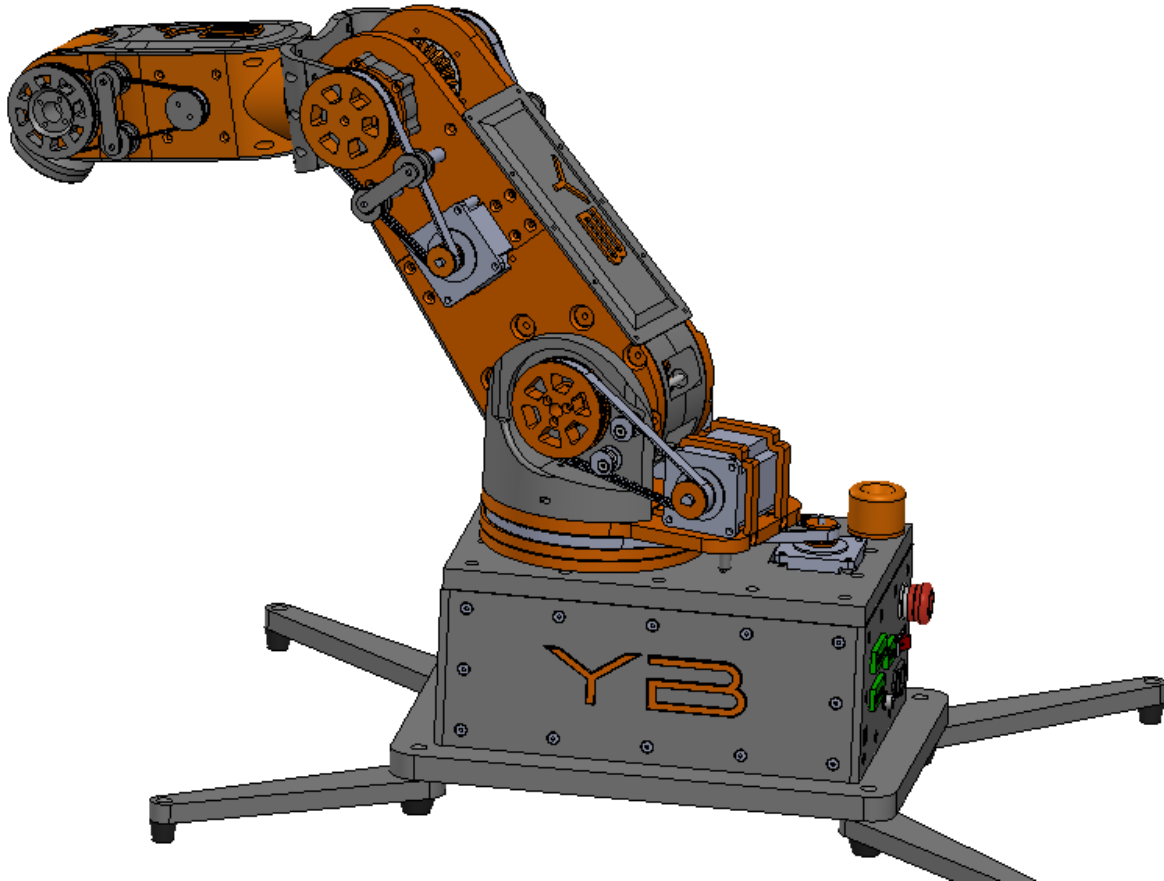


Figura 76 Ensamblaje de las articulaciones y la base

5.7. Diseño de la pinza

Para el elemento que iría en el punto terminal, se ha diseñado una pinza de 4 garras para la manipulación de pequeñas piezas. Esta pinza está motorizada y gestiona la apertura y el cierre mediante un tornillo sin fin al que a acoplado a un pequeño motor DC. En la Figura 77 se puede observar cómo ha quedado esta.

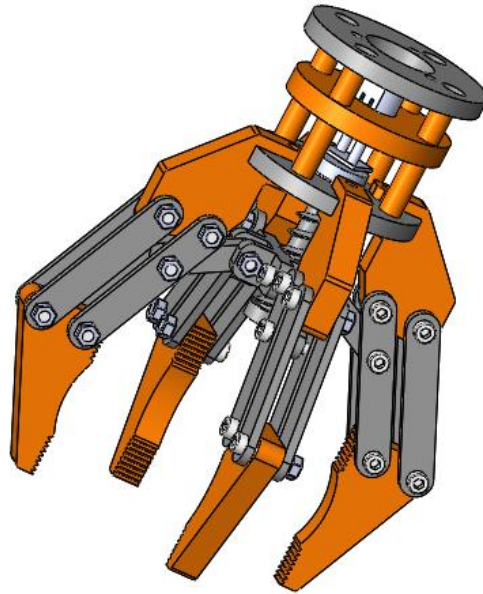


Figura 77 Pinza del punto terminal

Después del diseño de la pinza, el conjunto quedaría como se muestra en la Figura 78.



Figura 78 Ensamblaje completo del brazo robótico

5.8. Medidas del brazo y área de trabajo

Respecto a las medidas del brazo y los grados de giro que este tiene, estos se pueden apreciar en la Figura 79 y Figura 80. De allí se puede obtener el área de trabajo.

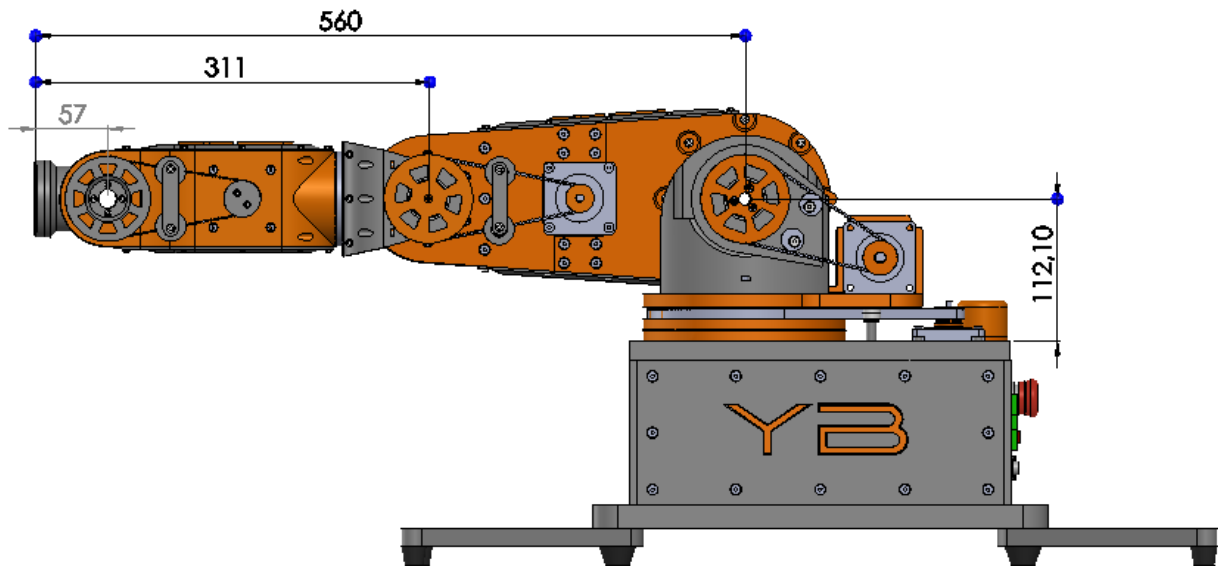


Figura 79 Medidas del brazo.

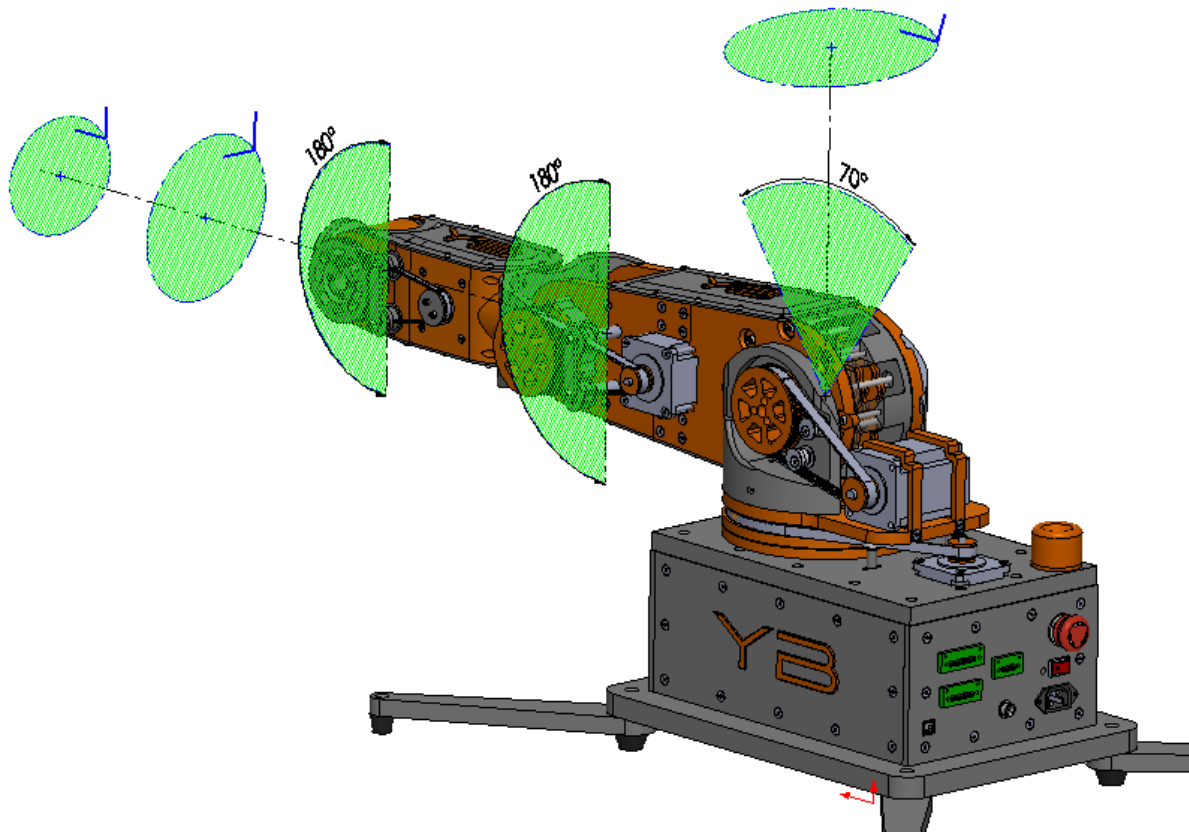


Figura 80 Grados de giro de las articulaciones

6. FABRICACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO

6.1. Impresión de piezas en 3D

Una vez diseñado todo el brazo robótico se procederá a la parte de impresión de piezas para posteriormente ir montado el brazo. Para la impresión de piezas se ha utilizado la impresora **ENDER 3 PRO** como la de la Figura 81, con unas dimensiones de impresión de 220x220x250mm. Unas dimensiones suficientes para imprimir todas las piezas.



Figura 81 Impresora ENDER 3 PRO

El material que se ha usado para las impresiones ha sido **PETG** de color naranja y gris espacial. Se ha elegido este material por la facilidad de impresión, por la y la resistencia que tiene adhesión entre las capas es fuerte en comparación por ejemplo con el PLA. El PETG tiene también la ventaja de que la resistencia a UVA y humedad es buena además de tener la temperatura de deformación alta por lo que resistirá los posibles calentamientos de motores.

Para las correas se ha elegido un **filamento flexible TPU de una dureza de 95A** para que la relación entre la flexibilidad y resistencia sea equilibrada.

Después de elegir el tipo de material que vamos a usar, se comenzará a imprimir piezas. Para este paso, se tiene que exportar las piezas diseñadas en formato “.STL”

para así importar luego el fichero a un programa SLICER. En este caso se ha elegido **CURA**.

Para los ajustes de impresión, todas las piezas tienen una **altura de capa de 0.2mm, un grosor de pared de 1.2mm y una densidad de relleno del 50%**.

El parámetro de altura de capa puede parecer bajo por las dimensiones de algunas piezas ya que tardarían demasiado pero como no había problema con el tiempo, se ha decidido de dejarlo así. En las siguientes ilustraciones se muestra el resultado de algunas de las piezas imprimidas.

Para el montaje de las diferentes piezas, se han necesitado varias herramientas como un atornillador, juego de llaves Allen, un cúter, soldador y alicates de punta, etc. En las

Figura 82 y Figura 83 se observan algunos de estos montajes.

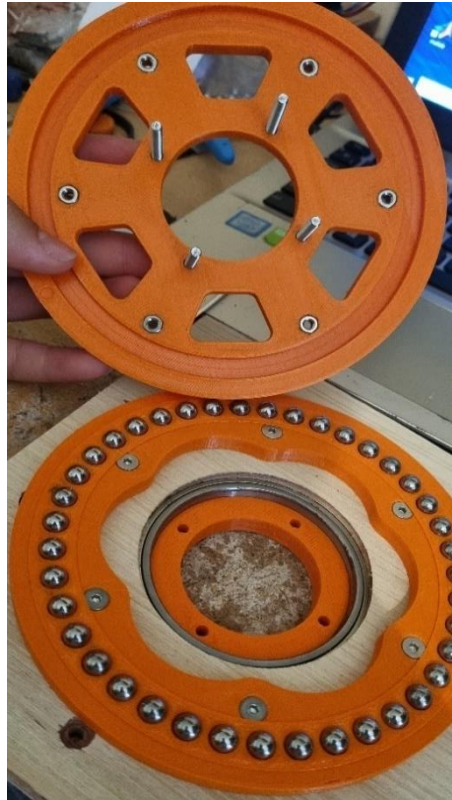


Figura 82 Piezas articulación 1



Figura 83 Ensamblaje articulaciones 3/4, 5 y 6



Figura 84 guía flexible para los cables

En el caso de los soportes de la articulación 2, en los huecos de abajo es donde se insertan las tuercas para luego atornillarlos con la base usando **tornillos M4**. El orden del ensamblaje es **muy importante** ya que, si se ensambla en otro orden, no será posible. Para el orden del ensamblaje, primero hay que fijar estos soportes en la base de la primera articulación dejando puesto el tornillo de debajo ya que una vez juntadas las dos piezas no se puede introducir. Una vez hecho este paso, ahora se atornilla la base con el resto de la articulación 1 y para acceder al tornillo introducido anteriormente, se ha dejado un pequeño orificio donde se puede meter la herramienta y apretar el tornillo. En la Figura 85 se ve más claro.

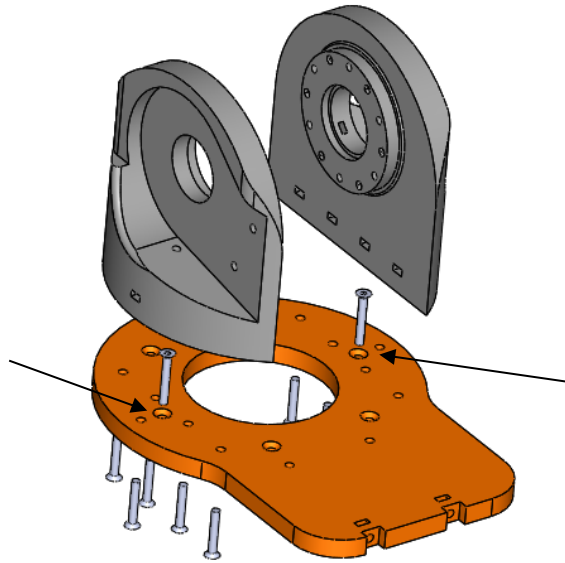


Figura 85 Montaje de los soportes laterales de la articulación 2

Hay que mencionar que no todo fue un éxito como se observa en la Figura 86 y algunas de las piezas de la articulación 6, debido a que se conectó el motor a 24v cuando este solo soporta 12v. Un despiste que sirvió para pensar alguna solución respecto al calentamiento de motores ya que hay algunos de estos que se encuentran “encerrados” y no hay forma de saber la temperatura por el tacto, por lo tanto, se tuvieron que poner **sensores de temperatura** para todos los motores y monitorizarlos en la pantalla para así prevenir posibles accidentes. Tanto las piezas como el motor se han tenido que replazar.

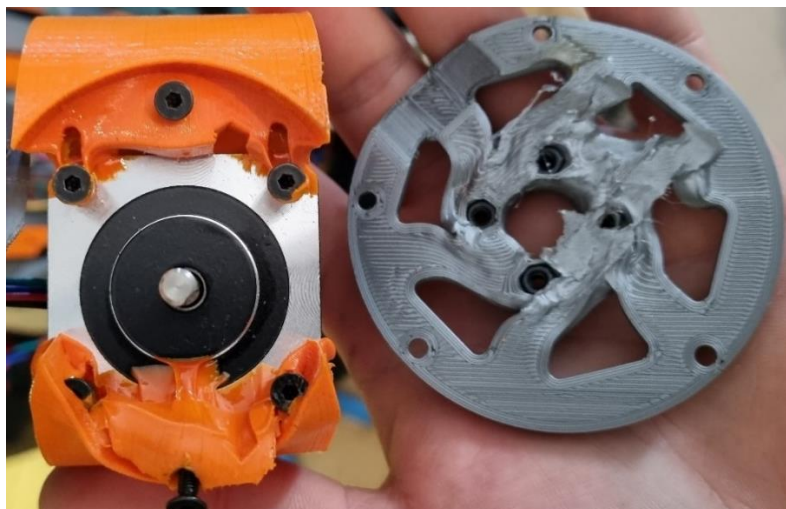


Figura 86 Deformación de piezas por sobrecalentamiento

6.2. Fresado de piezas para la base

Las piezas de madera de la base se han cortado y fresado con una **CNC 3018** como la de la Figura 87. Se ha hecho de esta forma porque para realizar el fresado de la rejilla del ventilador o los huecos de los diferentes conectores sería más complicado e impreciso hacerlos a mano.



Figura 87 CNC 3018

Para el archivo de fresado en una CNC, este debe de tener el formato “.nc”. En este caso, no se ha hecho mediante SOLIDCAM que sería una extensión en SOLIDWORKS, ha sido **FreeCAD**, que es un programa gratuito para el diseño e igual que SOLIDWORKS y también incluye la opción del mecanizado, pero en este, sí fue más asequible aprender.

Para ello, se diseñaba la pieza que se quería fresar en SOLIDWORKS, se exportaba en formato “.IGS” y luego se importaba en FreeCAD para llevar a cabo las operaciones del fresado.

Los pasos a seguir serían que, una vez importada la pieza, en el menú desplegable se selecciona la opción de “Path” como se muestra en la Figura 88 que sería para mecanizar piezas.

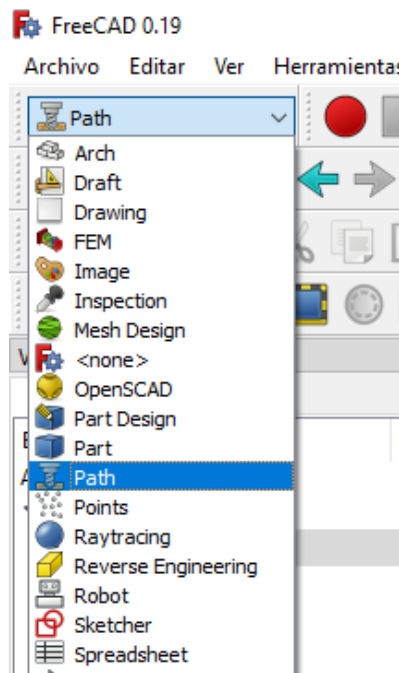


Figura 88 Fresado de pieza en FreeCAD 1

Una vez realizado ese paso, ahora se tendría que elegir qué tipo de operación queremos en el menú de la Figura 89:



Figura 89 Fresado de pieza en FreeCAD 1.1

Seleccionando eso ya nos aparecen todas las opciones que se muestran en la Figura 90 en donde se configura la operación que hemos elegido. En los siguientes puntos se explica brevemente en que consiste cada apartado:

- En “base de la geometría” se seleccionan las bordes o caras en las que se desea hacer cortes o rebajes.
- En “profundidades” se pone la profundidad del comienzo del fresado, la del final de fresado y luego la profundidad de avance.
- En “alturas” es la altura de seguridad que el Spindle (husillo) tiene que subir para realizar los desplazamientos.
- En “operación” se seleccionan el lado de corte si es por el interior o exterior, la dirección, si hay algún offset, etc.

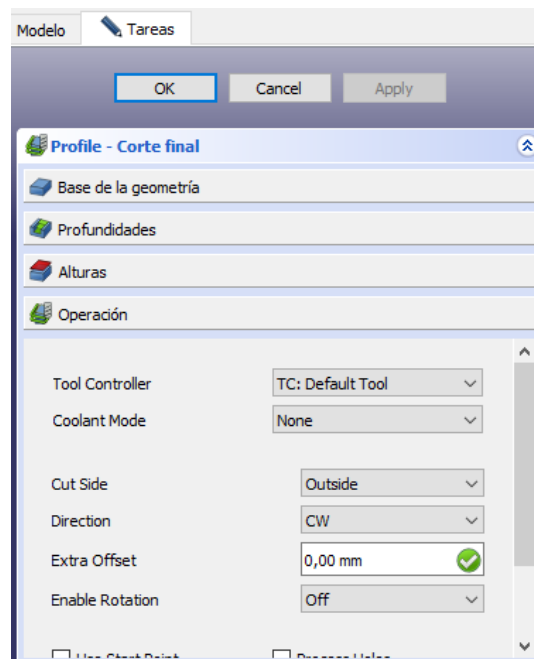


Figura 90 Fresado de pieza en FreeCAD 1.2

Después configurar las diferentes operaciones deseadas, quedaría en la pieza marcada la ruta por donde pasará la herramienta como se observa en la Figura 91:

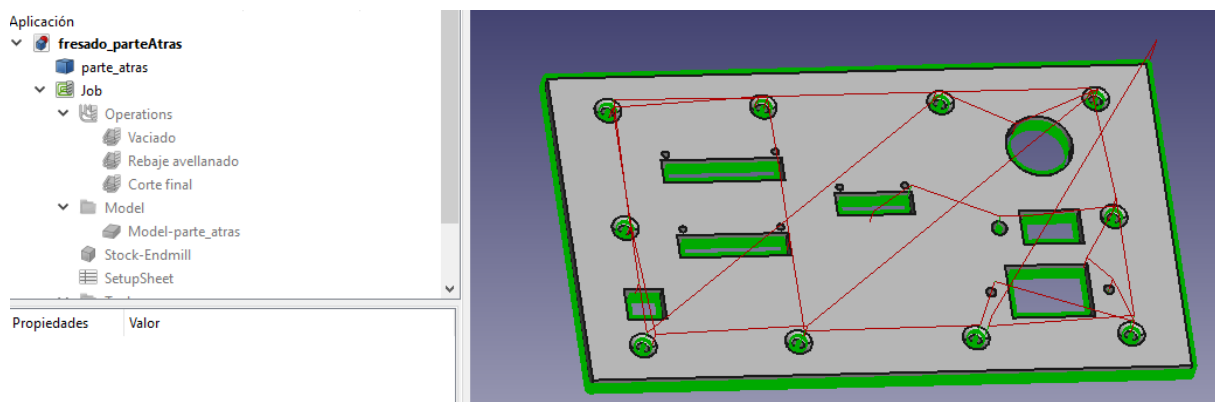


Figura 91 Fresado de pieza en FreeCAD 1.3

Finalmente, para obtener el archivo que hay que cargarle a la CNC hay que darle al segundo icono con la flechita roja hacia abajo. Se puede apreciar en la Figura 92.



Figura 92 Fresado de pieza en FreeCAD 1.4

Una vez que tenemos el archivo que necesitamos, se abre otro programa para comunicarnos con la CNC. Este programa sería **Universal Gcode Sender** y mediante él, se carga el archivo con las operaciones que tiene que realizar la CNC. Antes de

mandar la CNC a realizar el proceso, es muy importante **definir el punto de origen** de las coordenadas X, Y y Z. Para la herramienta de fresado se ha utilizado una **broca en espiral de un filo de 3.175mm**. En la Figura 93 se puede observar un ejemplo de fresado de una pieza.

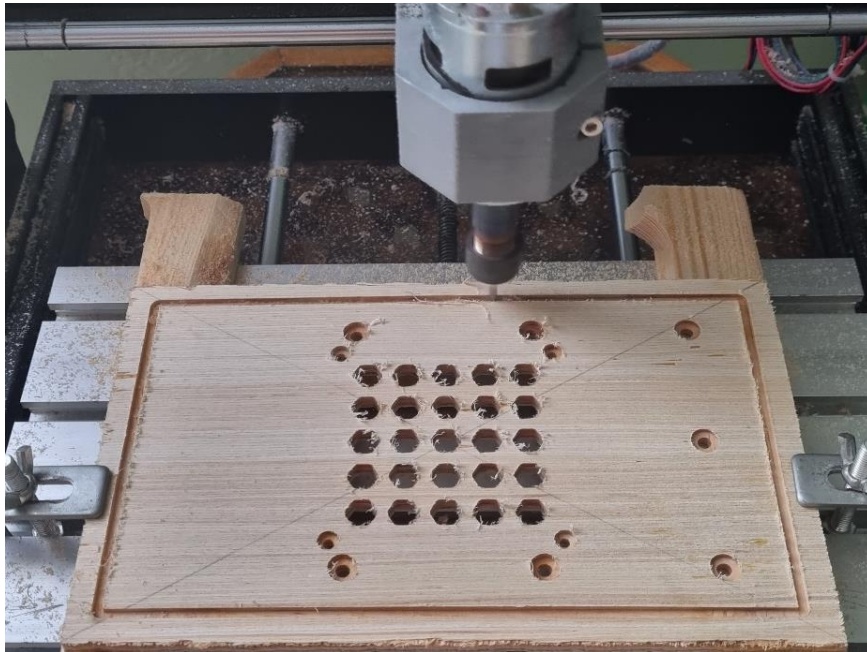


Figura 93 Ejemplo de fresado de una pieza

Después de fresar todas las piezas procedemos a “forrarlas” con la pegatina con acabado de fibra de carbono.

Una vez terminada la impresión y fresado de todas las piezas, procedemos al montaje del brazo robótico. Todas estas partes van atornilladas con tornillos de métricas **M2, M2.5, M3, M4 y M5** con sus respectivas tuercas y en ciertos casos tuercas de inserción. En la Figura 94 se puede observar el resultado final del brazo ya montado por completo.

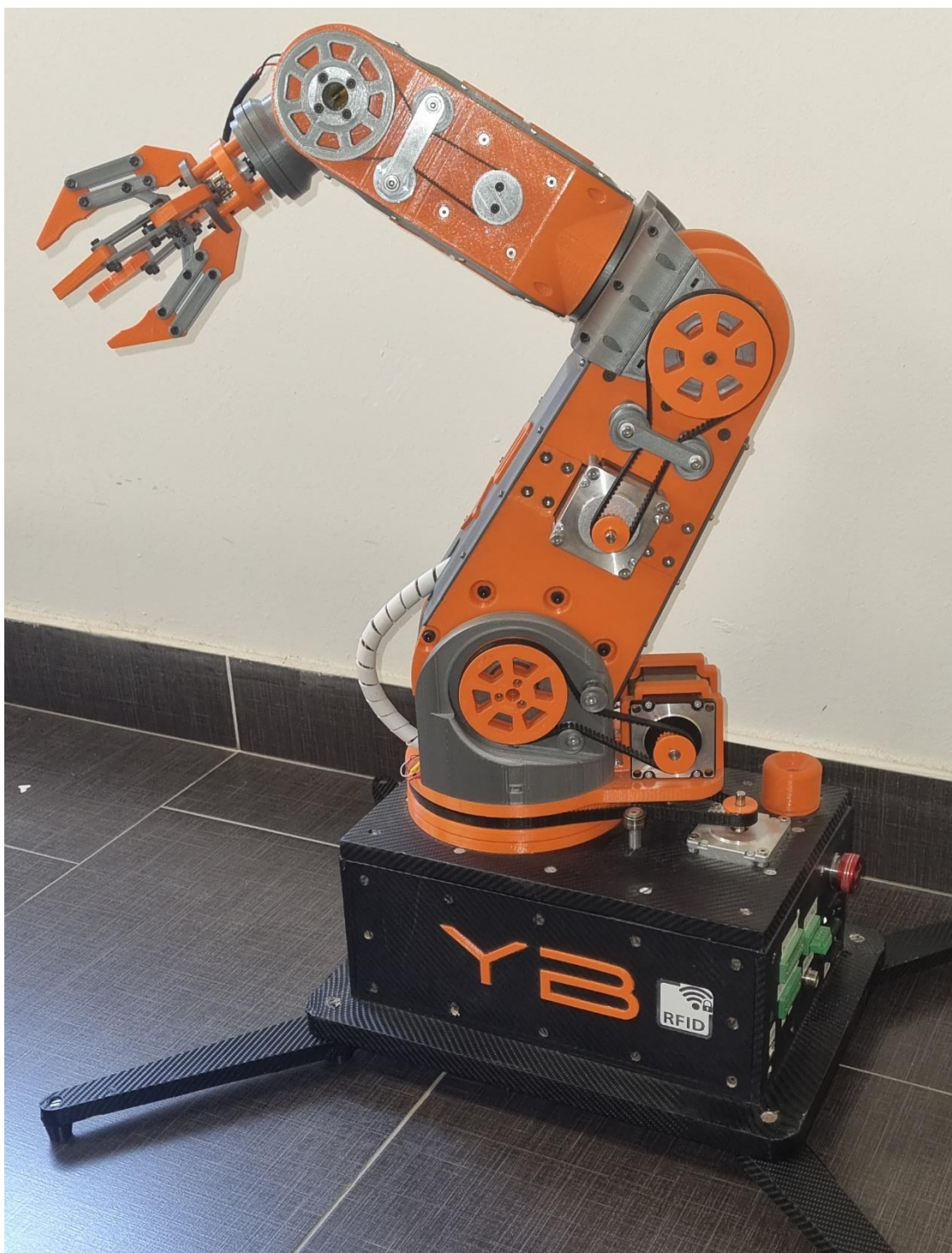


Figura 94 Montaje completo de todas las piezas del brazo robótico

7. ELECTRÓNICA

Para el control del brazo robótico, como se ha mencionado anteriormente se ha hecho a través de un microcontrolador, en concreto el **Arduino Mega**. A este se han conectado todos los drivers de los motores, finales de carrera, etc salvo los sensores de temperatura ya que estos van por medio de otro microcontrolador, el **Arduino Pro Mini**. Para interactuar con el brazo se ha hecho uso de una pantalla táctil cuyo modelo es **Nextion Enhanced 7"** con referencia NX8048K070.

El conexionado de la electrónica al Arduino Mega, están hechas de acuerdo a la siguiente tabla:

Dispositivos a conectar	Pines Arduino Mega
Driver motor 1	Enable: 48 ; Dir: 49 ; Step: 46
Driver motor 2	Enable: 44 ; Dir: 45 ; Step: 42
Driver motor 3	Enable: 40 ; Dir: 41 ; Step: 38
Driver motor 4	Enable: 36 ; Dir: 37 ; Step: 34
Driver motor 5	Enable: 32 ; Dir: 33 ; Step: 30
Driver motor 6	Enable: 28 ; Dir: 29 ; Step: 26
Final de carrera articulación 1	47
Final de carrera articulación 2	43
Final de carrera articulación 3	39
Final de carrera articulación 4	35
Final de carrera articulación 5	31
Driver L298N	A1: 62 ; A2: 63
Módulo RFID	SDA: 53 ; SCL: 52 ; MISO: 50 ; MOSI: 51 ; RST: 5 ; GND: GND ; VCC: 3.3v
Lectura sensores temperatura Arduino Pro Mini	Serial 3 -> RX3: 15
Pantalla Nextion	Serial 2 -> TX2: 17 ; RX2: 16
Pin interrupción seta de emerg.	2
LEDs	LED seta: 7 ; Rojo: 8 ; Verde: 10 ; Azul: 9 ; Monitoreo: 13
Relés	Rele1: 60 ; Rele2: 61

Tabla 23 Tabla de conexiones a los pines del Arduino

El conexionado de la electrónica al Arduino Pro Mini, están hechas de acuerdo a la siguiente tabla:

Dispositivos a conectar	Pines Arduino Pro Mini
Sensores de temperatura	3

7.1. Plano electrónico

Para el plano electrónico, los circuitos se han diseñado en el programa de **PROTEUS**. En la siguiente Figura 95 se muestra el diagrama de conexiones.

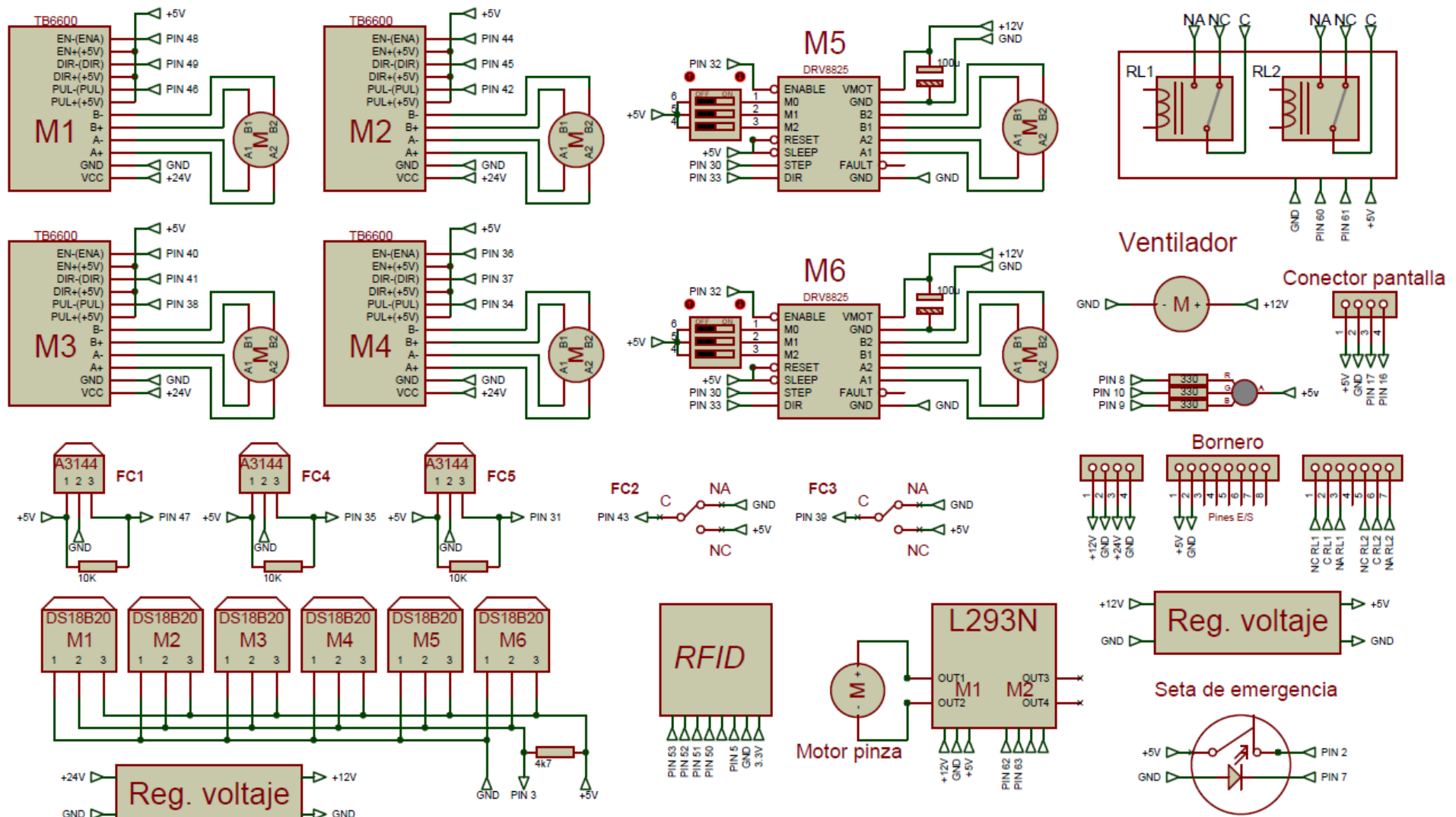


Figura 95 Plano electrónico

Como se puede observar en el esquema anterior, en la toma de 220v que irá a la fuente de alimentación, se ha colocado un **LED RGB para la señalización** siendo el color rojo un indicador de que está enchufado 220v y al accionar el interruptor cambiará al color verde indicando que la electrónica está siendo alimentada mediante la fuente de 24v.

Como bien sabemos los LEDs funcionan en corriente continua y a un voltaje muy reducido, por lo que no podemos conectarlo directamente a 220v. Para ellos se ha diseñado un pequeño circuito que se puede observar en la Figura 96 con más detalle.

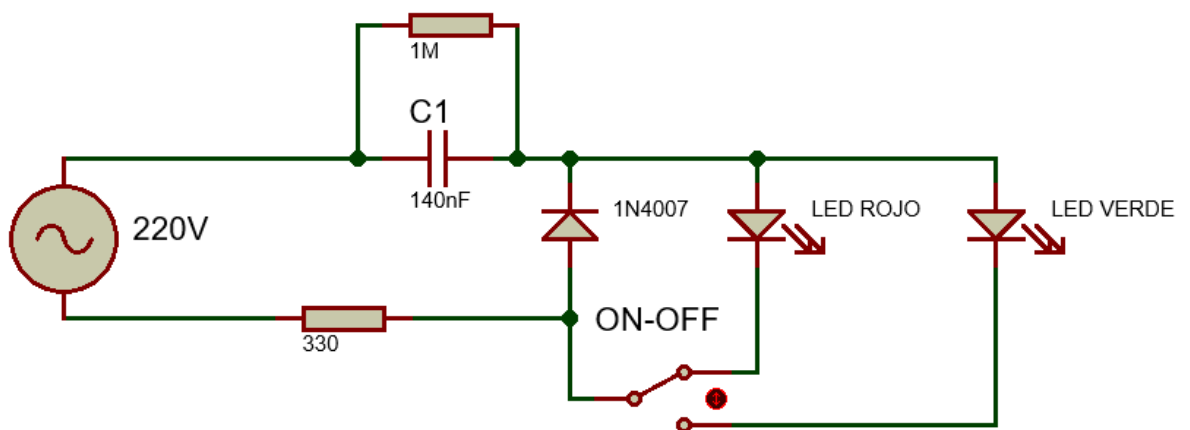


Figura 96 Circuito conexión LED a 220v

Analizando el circuito podemos observar que hay un condensador. Este en corriente alterna no consume potencia activa, por lo tanto, es mucho más eficiente que colocar una resistencia ya que estas suelen calentarse mucho. Cabe destacar que, si no ponemos el diodo invertido en paralelo al LED, el condensador no estaría trabajando en alterna ya que solo recibiría la semi onda y en ese caso sería corriente continua pulsante y para forzarlo a trabajar en alterna se ha puesto dicho diodo pudiendo trabajar en la semi onda positiva y negativa.

Para limitar la corriente del LED se ha elegido una resistencia de 330Ω de 1/8W.

Para calcular el valor de condensador se ha hecho uso de las siguientes fórmulas:

$$I = \frac{V}{X_C} \quad (\text{Fórmula 5})$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (\text{Fórmula 6})$$

$$I = \frac{V}{X_C}; X_C = \frac{230V - 2V}{10mA}; X_C = 22.8 K\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C}; C = \frac{1}{2\pi f \cdot X_C}; C = \frac{1}{2\pi 50 \cdot 22800}; C = 1.4 \cdot 10^{-7} F \rightarrow 140nF$$

Un valor comercial sería 150nF a 400V. Para descargar el condensador en un momento de desconexión se le coloca una resistencia grande de 1MΩ 1/8W. El tiempo que tardaría el condensador en descargarse sería:

$$T = 5 \cdot R \cdot C \quad (\text{Fórmula 7})$$

$$T = 5 \cdot R \cdot C; T = 5 \cdot 10^6 \cdot 140 \cdot 10^{-9}; T = 0.7s$$

Respecto al valor de resistencia que se les ha colocado a los sensores de temperatura, este depende de la distancia del cable que tendrían los sensores. En la Tabla 24 se pueden observar las resistencias para cada distancia. En nuestro caso como la distancia es mejor de 5m, he utilizado una **resistencia de 4.7 KΩ**.

Resistencia Pull-up	Distancia del cable
4.7 KΩ	De 0m a 5m
3.3 KΩ	De 5m a 10m
2.2 KΩ	De 10m a 20m
1.2 KΩ	De 20m a 50m

Tabla 24 Resistencia en función de la longitud del cable

8. PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DEL BRAZO

La programación está basada y hecha en el IDE Arduino siendo este el propio software de la placa de Arduino.

Para la programación se han utilizado varias librerías que facilitan la programación como *AccelStepper.h* para los motores paso a paso y *Nextion.H* para la pantalla Nextion entre otras librerías.

Primero se procede a declarar las diferentes variables como la asignación de pines de cada sensor. En una de estas variables está definido el número de pasos máximo que puede girar el motor actuando este como un encoder por software evitando así que los cables se enreden.

El **void setup** se procede a determinar la configuración que tendrán los pines y la inicialización de diferentes velocidades de comunicación.

La velocidad para la comunicación entre la pantalla y el Arduino es una de las cosas que ha sido difícil de resolver ya que cuando se intentaba mandar los datos de temperatura y posición al mismo tiempo mientras los motores estaban en movimiento, genera un bloqueo porque los motores paso a paso usan timers que nunca se deben de bloquearse en el bucle Loop y al enviar los datos a la pantalla, el envío solía tardar unos milisegundos. Para solucionarlo se ha tenido que aumentar la comunicación a 250000 baudios para que así el envío de los datos a la pantalla sea el mínimo posible. Por lo que a mayor velocidad de comunicación menos se tarda en recibir o enviar datos. A parte de aumentar la velocidad, también se ha hecho una función para disminuir el bloqueo de la que se hablará más adelante.

Aquí se justifica un ejemplo mediante cálculos:

Si enviamos desde el Arduino a la pantalla por ejemplo la palabra “**universidad**” en la que hay 11 bytes. A una velocidad de 9600 baudios tardaría:

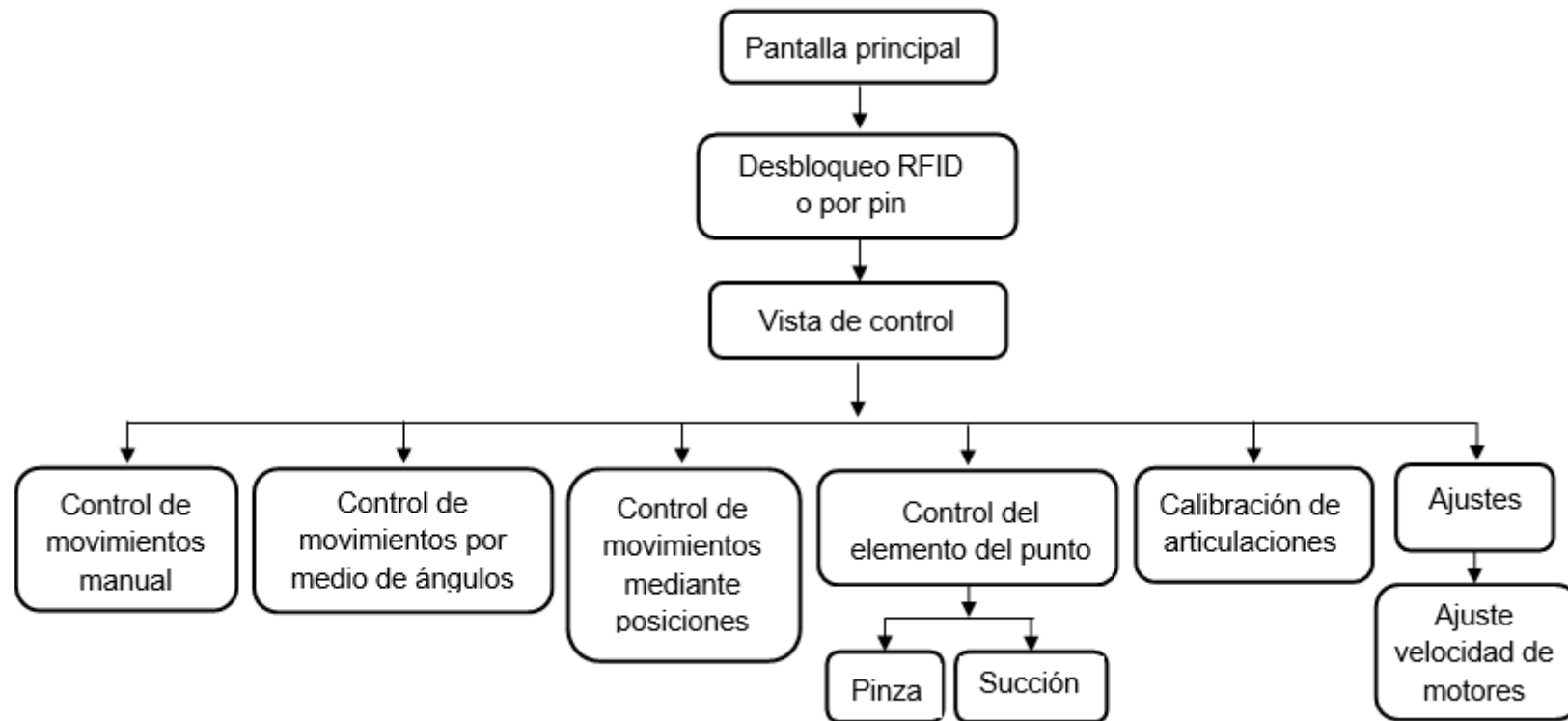
$$11\text{bytes} * 8\text{bitsPorByte} / 9600 \text{ baudios} = \mathbf{9.1 \text{ ms.}}$$

Aumentando la velocidad a 250000 solo necesitaríamos:

$$11\text{bytes} * 8\text{bitsPorByte} / 250000 \text{ baudios} = \mathbf{0.35\text{ms}}$$

Después de terminar con la función setup, pasamos a la **función loop**. Esta función se caracteriza de que una vez acabada la ejecución de la función setup, el programa entra en la **función loop en un bucle infinito**. Hay que tener en cuenta, para una correcta ejecución de dicha función, es importante **no bloquear el loop** con temporizaciones utilizando por ejemplo la función de "*delay()*".

El control está hecho mediante varias formas de funcionamientos. A continuación, se muestra un gráfico general.



8.1. Ejecución de movimientos manualmente.

Esta función nos permite mover todas las articulaciones libremente y de forma manual. Para que el motor de la articulación se ponga en marcha se tienen que dar una serie de condiciones de forma anidada. Primero se tendrá que habilitar el motor y después según el botón que se pulse en la pantalla, la articulación se moverá en un sentido o en otro. En caso de que se accione el final de carrera o se alcance el número máximo de pasos predefinidos anteriormente, la articulación dejará de moverse.

En caso de que el sensor de final de carrera se activa, se resetea la posición actual a 0 pero hay que tener en cuenta que, al mover el motor en sentido contrario, el sensor sigue activado por unos pasos debido a que el sensor sigue recibiendo el campo magnético del imán haciendo que el reseteo sea continuo hasta que el sensor se aleje lo suficiente para que el sensor cambie de estado. Esto hace que la lectura de los grados sea ligeramente incorrecta y para solucionarlo se ha puesto una variable que actúa como un SET-RESET que, una vez activado el sensor, la variable cambia a nivel alto y se resetea cuando el sensor cambia de estado.

Mientras se esté ejecutando el bucle, si alguna de las condiciones cambia de estado y ya no se da, inmediatamente se saldrá de ese bucle.

8.1. Calibración de los motores

Para calibrar la posición de las articulaciones, conocido también con el nombre de HOME, este proceso se ejecutará cuando el motor en cuestión esté habilitado y se le hará girar en el sentido adecuado hasta recibir la señal del sensor o final de carrera que le hará salir del bucle.

8.2. Movimiento de las articulaciones introduciendo los grados

Para la función de mover las articulaciones introduciendo los grados por la pantalla, primero debemos de leer el texto introducido por pantalla, luego se tiene que convertir dicho texto a números enteros con la función `atoi()` ya que la función `.getText` obtiene el texto en tipo *char*. Después de hacerle llegar a la función los grados que queremos mover, debemos de hacer el cálculo para saber los pasos que tiene que dar el motor ya que este solo se mueve por número de pasos.

Por las características del motor, sabemos que cada paso que da el motor, este se mueve 1.8° . Por lo tanto, para que el motor de una vuelta completa, este debe de moverse 200 pasos:

$$\frac{360^\circ}{1.8^\circ} = 200 \text{ pasos}$$

Pero para más precisión, los drivers de los motores paso a paso tienen unos switchs para el *MIROSTEPPING* que lo que hace que en vez de girar 1.8° en un paso, los hace en varios para así tener la posibilidad de hacer movimientos muy pequeños y precisos. Por ejemplo, si el *microstepping* está configurado en 1600 pul/rev, para una que el motor diera una vuelta entera necesitaría 1600 pasos en vez de los 200, dando una precisión de 0.225° por paso o pulso en vez de los 1.8° .

$$\frac{360^\circ}{1600} = 0.225^\circ$$

No hay que olvidar añadir el valor del multiplicador que hace referencia a la relación de reducción de cada articulación. Por lo tanto, para obtener la ecuación, bastaría con deducir una simple regla de 3. Por ejemplo, sabiendo que para que el motor dé una vuelta de 360° necesita 1600 pasos, para 45° , debería de dar X pasos.

La fórmula final para saber los pasos que tiene que girar el motor en función de los grados introducidos quedaría así:

$$\frac{\text{Pulsos/rev} \cdot \text{Multiplicador}[\] \cdot \text{GradosM}[\]}{360} = x \text{ pasos} \quad (\text{Fórmula 8})$$

Cabe destacar que si el valor de los pasos obtenidos es flotante, es decir, que es un numero con coma, este ignorará el valor que haya después de la coma dejando solo un número entero cometiendo así un pequeño error de 0.225° como máximo.

8.3. Movimiento de las articulaciones por posiciones guardados

En esta función lo que se pretende hacer es mover las articulaciones en la secuencia en la que se haya ido guardando las posiciones del brazo. Para lo tanto, cada vez que se pulsa el botón de GUARDAR se llamará una función que hace una lectura de las posiciones de todos los motores y luego se guardan en una matriz llamada *posicionesWP*[[]] dichas posiciones en una fila. Cada vez que se pulsa GUARDAR, se guardarán las posiciones en la siguiente fila y así sucesivamente hasta 20 posiciones pudiendo modificar el número de posiciones al que se desee.

Después de guardar todas las posiciones que deseemos, al pulsar el botón de PLAY, se ejecutará en la que se realizarán los movimientos en secuencia gracias a la función de `.runSpeedToPosition()` con un tiempo de espera de 500ms. La desventaja de esta función es que hace que el bucle *loop* se bloquee mientras se esté ejecutando.

Dándole al botón de RESET, se “borra” el valor guardado en las posiciones y se resetea a 0 el número del way point que hace referencia a la fila de la matriz para que así pueda empezar a guardar posiciones desde la fila 0.

8.4. Paro de emergencia:

Al pulsar la seta para el paro de emergencia, se encenderá un piloto de color rojo e inmediatamente pararán todos los motores. También aparecerá un texto de tipo *scroll* con movimiento en la pantalla con el mensaje de SETA DE EMERGENCIA ACCIONADA. En la se puede observar cómo Figura 97 sería.

8.5. Lectura de tarjeta RFID

Para el desbloqueo de la pantalla por medio de una tarjeta RFID, primero la función esperará la presencia de una tarjeta. Después, cuando haya una tarjeta presente, se procederá a leer el identificador de la tarjeta bit a bit y lo comparará con el identificador previamente guardado en el sistema. En caso de que el identificador leído sea igual que el guardado en el microcontrolador, se mostrará en la pantalla el mensaje de “*usuario identificado*” y ya se cambia a la vista de control. En caso contrario, se mostrará el mensaje de “*usuario no identificado*” y tendremos que intentar de nuevo la operación con la tarjeta adecuada.

8.6. Solución al no bloqueo para la lectura de la temperatura.

Para obtener la lectura de los sensores de temperatura colocados en los motores, se ha hecho a través de un **Arduino Pro Mini** ya que es una operación crítica que no debe de bloquear al Arduino mega. Por lo tanto, se ha solucionado poniendo otro el Arduino Pro mini que se encarga de obtener las lecturas y ya luego se mandan al Arduino Mega por el puerto serial.

Estos sensores de temperatura, se conectan en un mismo pin de entrada y para dirigirnos al sensor en cuestión, estos tienen un identificador único con el que

podemos obtener la información que se desea. Por lo tanto, antes de conectarlos todos juntos, debemos de conectar los sensores de uno en uno y obtener el identificador para saber el motor en el que está puesto.

Una vez cargado el código en el Arduino Pro Mini, se tendrá que obtener los datos de temperatura en el Arduino Mega para que posteriormente se visualicen en pantalla. Para ello, se ha programado una función que hace la lectura de bit a bit de los datos recibidos por el serial que disminuye el bloqueo. Dicha función se ha sacado de internet [5]. En dicha función también se realiza el envío de la posición de los motores en grados, pero la posición se actualiza una vez el motor se para ya que, si se actualiza mientras el motor gira, genera un pequeño bloqueo.

8.7. Piloto de señalización:

En esta función se ha implementado el código del piloto de señalización de un led que notifica mediante un parpadeo verde cuando el brazo este parado y parpadea en rojo cuando el brazo esté en movimiento. El motivo principal de este led aparte de notificar el estado en el que se encuentra el brazo, también sirve para ver si en algún momento el código se encuentra bloqueado ya que en este caso el led no parpadea y se queda fijo (o encendido o apagado).

8.8. Programación de la pantalla

Para la programación de la pantalla, se ha utilizado el propio software de la misma, llamado Nextion Editor. En el mismo programa se han configurado las diferentes vistas que se pueden ver junto a los botones y funciones que estos realizan.

Al encender el brazo, la vista que veremos en la pantalla será la de la Figura 97 donde se le pedirá al usuario acercar la tarjeta RFID para proceder al desbloqueo de la pantalla. Si tenemos la seta de emergencia accionada, veremos un mensaje en pantalla notificándolo ya que si no se desarma la seta no se podrá desbloquear la pantalla.



Figura 97 Pantalla principal del terminal.

En caso de no tener una tarjeta válida, se podrá desbloquear la pantalla pulsando el botón mediante un clave de 4 dígitos como se puede apreciar en la Figura 98.



Figura 98 Pantalla de desbloqueo con pin

Además de estas dos posibilidades de desbloqueo de pantalla, también hay un tercer método para el desbloqueo pensado para el “servicio técnico” y sería pulsando el logo “YB” 5 veces como se muestra en la Figura 99.



Figura 99 Desbloqueo de la pantalla principal mediante logo

Después de desbloquear la pantalla nos aparecerá la vista de la Figura 100 en la que tendremos todo el control y funciones que puede realizar el brazo. En la vista disponemos de:

- En la parte izquierda habilitaremos los motores de las articulaciones que queramos mover.
- En la parte central podremos controlar las articulaciones de forma manual, es decir, el brazo hará movimientos mientras se tengan los botones pulsados.
- En la columna de posiciones, pulsando el recuadro podemos introducir los grados que queremos que la articulación se ponga y luego pulsamos MOVER POSICIONES para ejecutar los movimientos.
- En la parte de la derecha podemos observar que tenemos la opción de elegir entre pinza o la ventosa de succión que sería marcando el círculo de PINZA/SUCCIÓN.
- Mas abajo está la función de “lista de posiciones” donde podemos cada vez que pulsemos el botón de GUARDAR se incrementa el número de way points que tenemos guardados.
- Y en la parte inferior estarían los botones para calibrar cada articulación o hacerlos todos a la vez.

- En caso de tener la seta de emergencia accionada, veremos en la parte inferior una notificación del mensaje con movimiento.

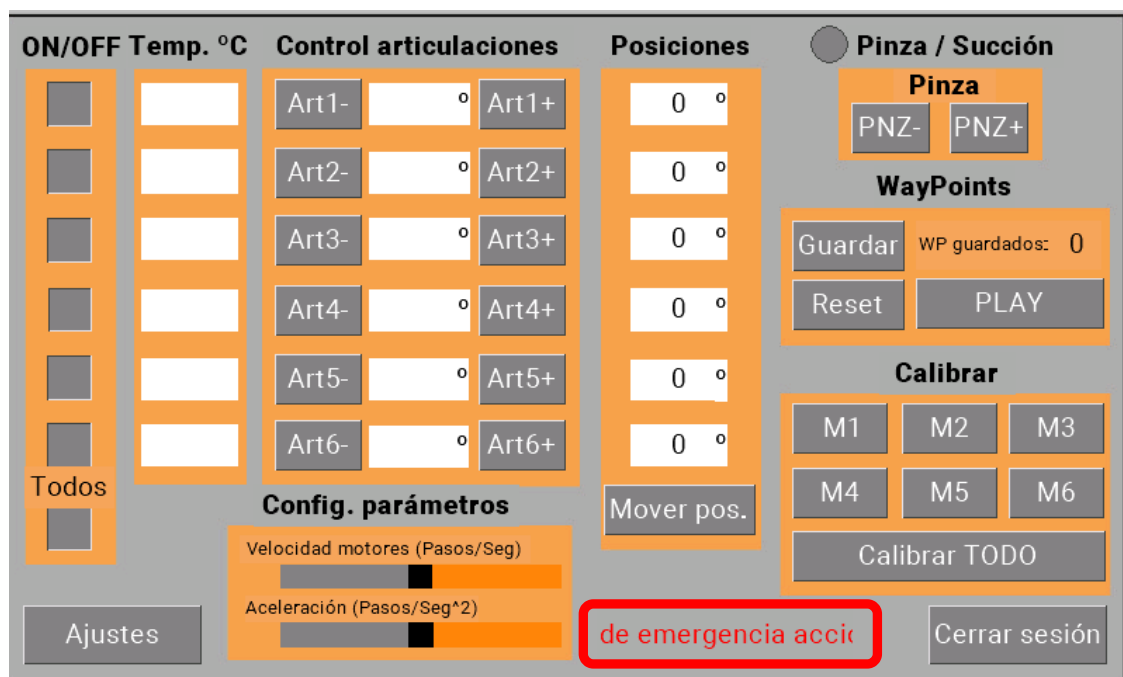


Figura 100 Pantalla de control

Dándole al botón de AJUSTES cambiaremos a la vista de la Figura 101 donde podremos cambiar la velocidad de los motores. Pulsando el botón de VOLVER, aparece de nuevo la vista principal de control.

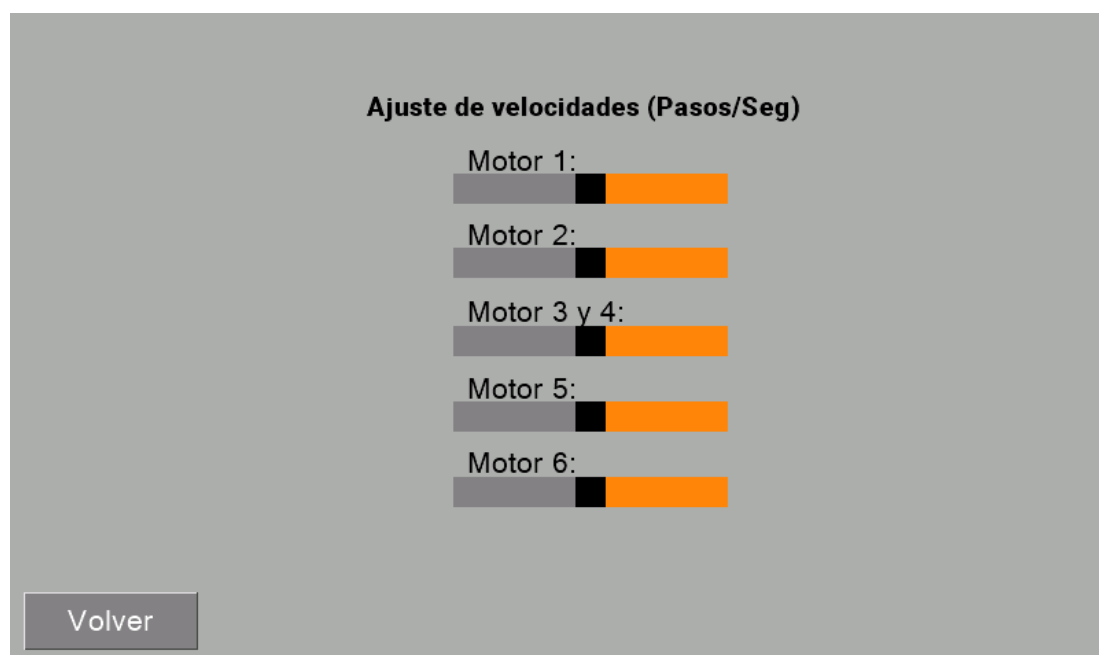


Figura 101 Vista de ajustes de los motores

9. PRESUPUESTO

9.1. Coste de diseño

Para el coste de diseño, tendremos que ver lo que cuesta la hora de un ingeniero industrial. Actualmente el precio es de **15,38€/h**.

Para el diseño del brazo de media se han invertido **7 horas diarias durante 4 meses** por lo que el coste de diseño sería:

$$\text{Coste diseño} = 15.38\text{€} \cdot 7h \cdot 120 \text{ dias} = \mathbf{12.919,2\text{€}}$$

9.2. Material

Respecto al material de construcción, se han necesitado varios kilos de filamento para la estructura del robot, varios tamaños de rodamientos y tornillos con sus respectivas tuercas entre otros materiales electrónicos como drivers, motores y sensores que se pueden observar en la siguiente lista.

Artículo	Precio (€)	Cantidad	Precio total (€)
Filamento PETG naranja 1kg	21,52	2	43,04
Filamento PETG gris 1kg	23	2	46
Filamento TPU negro 500g 95A	22	1	22
Motor nema 23 (82mm)	29,18	1	29,18
Motor nema 23 (56mm) + TB660 (3pcs)	43,35	1	43,35
Motor nema 17 (34mm)	6,7	1	6,7
Motor nema 17 (39mm)	9,88	1	9,88
Driver TB6600	5,05	1	5,05
Driver DRV8825	0,97	2	1,94
Zócalo Driver 8825	0,86	2	1,72
Motor DC Pinza	3,08	1	3,08
Driver L298N	2,05	1	2,05
Joystick 2 ejes	1,08	3	3,24
Finales de carrera (5pcs)	0,86	1	0,86
Sensor 3144 (10pcs)	0,42	1	0,42
Sensor DS18B20 (10 pcs)	3,37	1	3,37
Fuente alimentación 24v 400w	30,02	1	30,02
Regulador de voltaje LM2596	2.1	1	2.1
Regulador pequeño 3A (5pcs)	2,28	1	2,28
Arduino Mega	19,07	1	19,07
Pantalla Nextion 7"	121,59	1	121,59
Seta emergencia	4,7	1	4,7
Rodamiento 6814 (70x90x10)	8,74	3	26,22

Rodamiento 6706 (30x37x4) (10pcs)	17,8	1	17,8
Rodamiento MR128 (8x12x3,5) (10pcs)	2,57	2	5,14
Rodamiento 695 (5x13x4) (10pcs)	2,26	2	4,52
Rodamiento 6700 (10X15x4) (10pcs)	3,13	3	9,39
Rodamiento 6809 (45x58x7) (10pcs)	8,54	1	8,54
Rodamiento 6703 (17x23x4) (5pcs)	3,62	1	3,62
Rodamiento 6701 (12x18x4) (10pcs)	4,53	1	4,53
Rodamiento 693 (3x8x4) (10pcs)	2,26	3	6,78
Rodamiento 6704 (20x27x4) (4pcs)	3,78	1	3,78
Rodamiento 6807 (35x47x7) (2pcs)	2,83	1	2,83
Tornillo M2 (20mm) (25pcs)	1,26	1	1,26
Tornillo M2,5 (5mm) Flat (50pcs)	0,87	1	0,87
Tornillo M3 (8mm) Avellanado (25pcs)	1,34	1	1,34
Tornillo M3 (110mm) Redondo (5pcs)	3,97	1	3,97
Tornillo M3 (45mm) Avellanado (25pcs)	2,91	1	2,91
Tornillo M3 (60mm) Flat (10pcs)	3,11	1	3,11
Tornillo M3 (50mm) Avellanado (50pcs)	4,08	1	4,08
Tornillo M3 (14mm) Flat (25pcs)	1,66	1	1,66
Tornillo M3 (16mm) Avellanado (25pcs)	1,6	2	3,2
Tornillo M3 (30mm) Avellanado (25pcs)	2,15	1	2,15
Tornillo M3 (12mm) Avellanado (25pcs)	1,44	1	1,44
Tornillo M3 (16mm) Flat (25pcs)	1,66	1	1,66
Tornillo M4 (30mm) Avellanado (10pcs)	1,76	2	3,52
Tornillo M4 (25mm) Avellanado (10pcs)	1,66	2	3,32
Tornillo M4 (90mm) Flat (10pcs)	5,7	1	5,7
Tornillo M4 (40mm) Flat (10pcs)	2,07	1	2,07
Tornillo M4 (20mm) Avellanado (10pcs)	1,56	2	3,12
Tornillo M4 (40mm) Avellanado	1,95	1	1,95
Tornillo M4 (8mm) Avellanado (10pcs)	1,31	5	6,55
Tornillo M4 (20mm) Avellanado	1,65	3	4,95
Tornillo sin cabeza M2 (10mm) (10pcs)	0,7	1	0,7
Tornillo sin cabeza M3 (10mm) (10pcs)	0,63	1	0,63
Tuercas autoblocantes M3 (25pcs)	0,79	2	1,58
Tuercas M3 (50pcs)	1,29	1	1,29
Tuercas M4 (10pcs)	1,06	1	1,06
Juego tuercas inserción	5,16	1	5,16
Eje M4 (100mm) (2pcs)	1,9	3	5,7
Eje M5 (60mm) (10pcs)	5,42	1	5,42
Bolas acero 8mm (50pcs)	4,14	1	4,14
Imanes neodimio 5x1mm (10pcs)	1,81	1	1,81
Madera	45	1	45
Ventilador	3,21	1	3,21
Conector AC	2,26	1	2,26
Interruptor 6 pines	1,47	1	1,47

LED RGB (10pcs)	1,32	1	1,32
Bornas Macho/hembra 8 pines	2,17	1	2,17
Bornas Macho/hembra 7 pines	1,94	1	1,94
Bornas Macho/hembra 4 pines	1,22	1	1,22
Eje roscado hueco 10x30mm + 2 tuercas	2	1	2
Resistencias varias	0,1	10	1
Condensador 150nF	0,5	1	0,5
Conector Macho/hembra 4 pines	1,07	1	1,07
Termoretráctil	2,87	1	2,87
Total			647,14

9.3. Ensamblaje

Para el ensamblaje, se han necesitado unos **4 días** en total entre la estructura y el cableado de la electrónica.

Un operario actualmente cobra **10,17€/hora** por lo que el coste total del ensamblaje sería de:

$$\text{Coste ensamblaje} = 10,17\text{€} \cdot 8h \cdot 4 \text{ días} = 325,44\text{€}$$

9.4. Programación y puesta en marcha

La programación depende de lo hábil que sea el programador, pero de media han sido unos **3 meses**.

En ingeniero programador está cobrando unos **14,62€/h** por lo que el coste de programación y puesta en marcha sería:

$$\text{Coste programación} = 14,62\text{€} \cdot 8h \cdot 90 \text{ días} = 10.526,4\text{€}$$

Por lo tanto, sumando los diferentes costes obtendríamos el coste total de brazo robótico siendo este de:

Tipo de coste	Precio
Coste de diseño	12.919,20
Coste del material	647,14
Coste de ensamblaje	325,44
Coste de programación y puesta en marcha	10.526,40
Total: 24.418,18 €	

Tabla 25 Coste total

10. FUTURAS MEJORAS EN EL PROYECTO

Cabe destacar que el proyecto funciona bastante bien, aunque se plantean mejoras en futuras versiones:

- Añadir a la programación la cinemática directa e inversa.
- Añadir encoders para tener los motores en lazo cerrado.
- Cambiar a un microcontrolador cuyas prestaciones sean mejores.
- Cambiar o añadirle al motor de la pinza del punto terminal un control de posición.
- Mejorar el diseño para evitar posibles holguras.
- Cambiar las correas por unas comerciales.

11. Bibliografía

- [1] What is Cycloidal Driver?
<https://howtomechatronics.com/how-it-works/what-is-cycloidal-driver-designing-3d-printing-and-testing/>
Fecha última consulta abril 2023
- [2] What is Strain Wave Gear Harmonic Drive?
<https://howtomechatronics.com/how-it-works/what-is-strain-wave-gear-harmonic-drive-a-perfect-gear-set-for-robotics-applications/>
Fecha última consulta abril 2023
- [3] Cálculo del tren epicicloidal
<https://www.calculartodo.com/mecanica/tren-epicicloidal.php#calculo>
Fecha última consulta abril 2023
- [4] The Nextion Instruction Set
<https://nextion.tech/instruction-set/>
Fecha última consulta abril 2023
- [5] How to process incoming serial data without blocking
<http://www.gammon.com.au/serial>
Fecha última consulta abril 2023
- [6] Tutorial Nextion #5 – Dual State Button
<https://arduino-projekte.info/tutorial-nextion-5-dual-state-button/>
Fecha última consulta abril 2023
- [7] AccelStepper Class Reference
<https://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/classAccelStepper.html#ace236ede35f87c63d18da25810ec9736>
Fecha última consulta abril 2023
- [8] Reductor planetario
<https://harmonicdrive.de/es/glosario/reductor-planetario#:~:text=En%20reductores%20planetarios%20hay%20colocadas%20les%20llama%20ruedas%20planetarias.>
Fecha última consulta abril 2023
- [9] Canal Skyentific
<https://www.youtube.com/@Skyentific>
Fecha última consulta abril 2023

- [10] Canal Curious Scientist
<https://www.youtube.com/@CuriousScientist>
Fecha última consulta abril 2023
- [11] Canal James Bruton
<https://www.youtube.com/@jamesbruton>
Fecha última consulta abril 2023
- [12] Canal Electronoobs
<https://www.youtube.com/@ELECTRONOBSenEspanol>
Fecha última consulta abril 2023
- [13] Canal How to mechatronics
<https://www.youtube.com/@HowToMechatronics>
Fecha última consulta abril 2023
- [14] Canal Acadenas <https://www.youtube.com/@acadenas>
Fecha última consulta abril 2023
- [15] Canal Combatronics online
<https://www.youtube.com/@CombatronicsOnline>
Fecha última consulta abril 2023
- [16] Canal Monkey electronics
<https://www.youtube.com/@monkeyelectronics8615>
Fecha última consulta abril 2023
- [17] Canal Damian Lickindorf
<https://www.youtube.com/@damlic11>
Fecha última consulta abril 2023
- [18] Canal SolidWorks Tutorial
<https://www.youtube.com/@Sw-tcNet>
Fecha última consulta abril 2023
- [19] Canal Paul Gould Robotics
<https://www.youtube.com/@PaulGouldRobotics>
Fecha última consulta abril 2023
- [20] Canal Chris Annin
<https://www.youtube.com/@anninrobotics>
Fecha última consulta abril 2023
- [21] La robótica

<https://www.monografias.com/trabajos107/robotica-ciencia/robotica-ciencia>

Fecha última consulta abril 2023

[22] Historia de los Robots

<http://www.plazarobotica.es/2015/04/26/historia-de-los-robots/#:~:text=Entre%20los%20escritores%20de%20ciencia,conocido%20%E2%80%9CYo%2C%20Robot%E2%80%9D.>

Fecha última consulta abril 2023

[23] Robots industriales

http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/industrial.htm

Fecha última consulta abril 2023

[24] Robots industriales

http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.4.htm

Fecha última consulta abril 2023

[25] Robot de coordenadas cartesianas

https://www.wikiwand.com/es/Robot_de_coordenadas_cartesianas

Fecha última consulta abril 2023

[26] Robot Scara

[https://es.wikipedia.org/wiki/Robot_SCARA#:~:text=Un%20SCARA%20\(acr%C3%B3nimo%20que%20responde,de%20libertad%20con%20posicionamiento%20horizontal.](https://es.wikipedia.org/wiki/Robot_SCARA#:~:text=Un%20SCARA%20(acr%C3%B3nimo%20que%20responde,de%20libertad%20con%20posicionamiento%20horizontal.)

Fecha última consulta abril 2023

[27] Brazo robótico

https://es.wikipedia.org/wiki/Brazo_robot%C3%B3tico#:~:text=Robot%20cil%C3%ADndrico%3A%20Empleado%20para%20operaciones,un%20sistema%20de%20coordenadas%20cil%C3%ADndricas.

Fecha última consulta abril 2023

[28] Estructura de un robot industrial

http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/sistema/morfologia.htm

Fecha última consulta abril 2023

[29] Robots Paralelos, Conceptos y Aplicaciones

<https://es.slideshare.net/htrmoreno/robots-paralelos>

Fecha última consulta abril 2023

[30] Sistema de polea y correas

<http://almez.pntic.mec.es/igonza86/Sistemas%20de%20poleas%20y%20correas.htm>

Fecha última consulta abril 2023

[31] Sistema de polea y correas

<http://almez.pntic.mec.es/igonza86/Sistemas%20de%20poleas%20y%20correas.htm>

Fecha última consulta abril 2023

[32] ¿Cómo funciona un motor de Corriente Continua?

<https://motoresygeneradores.com/como-funciona-un-motor-de-corriente-continua/#:~:text=El%20principio%20de%20funcionamiento%20de,encuentra%20montado%20en%20un%20eje.>

Fecha última consulta abril 2023

[33] Motor eléctrico sin escobillas

https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_el%C3%A9ctrico_sin_escobillas

Fecha última consulta abril 2023

[34] Motor paso a paso

https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_paso_a_paso#:~:text=El%20motor%20paso%20a%20paso,de%20sus%20entradas%20de%20control.

Fecha última consulta abril 2023

[35] Motor paso a paso

https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_paso_a_paso#:~:text=El%20motor%20paso%20a%20paso,de%20sus%20entradas%20de%20control.

Fecha última consulta abril 2023

[36] Motor Paso a Paso 28BYJ-48 con Arduino junto al driver ULN2003 y el L298N

<https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/motor-paso-a-paso-uln2003-l298n/>

Fecha última consulta abril 2023

[37] Motores paso a paso

<https://elchals.wordpress.com/2015/04/12/motores-paso-a-paso-todo-lo-que-deseabas-saber-y-no-te-cotaron-en-barrio-sesamo/>

Fecha última consulta abril 2023