



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Prototipo educativo de un robot manipulador

Handling robot Educational Prototype

Autor

Álvaro García Ávila

Director

Javier Esteban Escaño

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia

Septiembre 2022



**Escuela Universitaria
Politécnica - La Almunia**
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Prototipo educativo de un robot manipulador

Handling Robot Educational Prototype

Identificador

Autor: Álvaro García Ávila

Director: Javier Esteban Escaño

Fecha: 9-2022

INDICE DE CONTENIDO BREVE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. DESARROLLO	7
3. CONCLUSIONES	70
4. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	72
5. BIBLIOGRAFÍA	73

INDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PALABRAS CLAVE	1
1.2. ABSTRACT	1
1.3. OBJETIVOS	2
1.4. ANTECEDENTES DE BRAZOS ROBÓTICOS EDUCATIVOS	3
1.4.1. WLKATA Mirobot	3
1.4.2. Dobot magician	4
1.4.3. Lynxmotion AL5D PLTW	6
2. DESARROLLO	7
2.1. ESTADO DEL ARTE	7
2.1.1. Tipos de configuraciones morfológicas	7
2.1.1.1. Cartesiana	7
2.1.1.2. Cilíndrica	7
2.1.1.3. Esférica	8
2.1.1.4. Angular	9
2.1.1.5. SCARA	9
2.1.2. Partes de un brazo robótico	10
2.1.3. Tipos de actuadores	10
2.1.3.1. Motor paso a paso	11
2.1.3.2. Motor Brushed	12
2.1.3.3. Motor Brushless	14
2.1.3.4. Servo motor	16
2.1.4. Sensores	18

2.1.4.1. Sensores de posición angular	18
2.1.4.1.1. Encoder	18
2.1.4.1.2. Potenciómetro	21
2.1.4.1.3. Sensores inductivos de posición angular RVDT	22
2.1.4.2. Sensores de presencia.	24
2.1.4.2.1. Final de carrera	24
2.1.4.2.2. Sensor capacitivo e inductivos	25
2.1.5. Tipos de transmisión	26
2.1.5.1. Transmisión por correas y poleas	26
2.1.5.2. Transmisión por engranajes	27
2.1.5.3. Transmisión por paralelogramo	28
2.1.5.4. Transmisión directa	28
2.2. DISEÑO MECÁNICO	29
2.2.1. Especificaciones iniciales.	29
2.2.2. Elección de los actuadores.	30
2.2.2.1. cálculos para el par de los motores	31
2.2.2.2. Motores escogidos	34
2.2.3. Diseño inicial	37
2.2.4. Mejora del diseño	41
2.2.5. Diseño final	45
2.2.5.1. Modificaciones y soluciones en el diseño	45
2.2.5.2. Finales de carrera	49
2.2.5.3. Componentes y montaje	54
2.3. DISEÑO ELECTRÓNICO	57
2.3.1. Componentes utilizados	57
2.3.1.1. Control de motores	57
2.3.1.2. Control general y manejo del robot	59
2.3.1.3. Alimentación	60
2.3.2. Esquemas eléctricos	61
2.4. DESPLIEGUE DE COMPONENTES	63
2.5. MONTAJE	64
3. CONCLUSIONES	70
4. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	72
5. BIBLIOGRAFÍA	73

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 WLKATA Mirobot (WLkata, 2022)	3
Ilustración 2 Dobot magician (Dobot, 2022).....	5
Ilustración 3 Lynxmotion AL5D PLTW (Lynxmotion, 2022)	6
Ilustración 4 Configuración Cartesiana (Platea, 2016).....	7
Ilustración 5 Configuración Cilíndrica (Platea, 2016).....	8
Ilustración 6 Configuración Esférica (Platea, 2016)	9
Ilustración 7 Configuración Angular (Platea, 2016).....	9
Ilustración 8 Configuración SCARA (Platea, 2016).....	10
Ilustración 9 Motor paso a paso (bricogeek, 2022a)	11
Ilustración 10 Motor paso a paso junto a controlador ULN2003 (Techlook, 2022)	12
Ilustración 11 Motor brushed (Amazon, 2022)	13
Ilustración 12 Puente en H (García, 2014)	13
Ilustración 13 Motor brushless (Hetpro, 2022).....	14
Ilustración 14 Pulsos fases motor brushless (Solchaga, 2015)	15
Ilustración 15 Esquema de control motor brushless (Digikey, 2022).....	15
Ilustración 16 Servomotor (tdrobotica, 2022).....	16
Ilustración 17 Anchos de pulso control servo (Maker, 2022)	17
Ilustración 18 Encoder (RS, 2022)	18
Ilustración 19 Funcionamiento interno encoder incremental (Euroencoder, 2022a)	19
Ilustración 20 Señal de salidas encoder incremental (Celeramotion, 2022).....	19
Ilustración 21 Funcionamiento interno encoder absoluto (Ibaindustrial, 2022) ..	20
Ilustración 22 Funcionamiento interno encoder magnético (Euroencoder, 2022b)	21
Ilustración 23 Potenciómetro (Makerelectronico, 2022).....	22
Ilustración 24 Sensor RVDT (Sensing, 2022)	22
Ilustración 25 Devanador sensor RVDT (Mecafenix, 2022)	23

Ilustración 26 Final de carrera (bricogeek, 2022b)	25
Ilustración 27 Sensor capacitivo e inductivo (Secoin, 2022)	26
Ilustración 28 Transmisión por correa (Directindustry, 2022)	27
Ilustración 29 Transmisión por engranaje (Ingemecanica, 2022)	27
Ilustración 30 Transmisión por paralelogramo (Arroyo Belmonte, 2018)	28
Ilustración 31 Grados de libertad	29
Ilustración 32 Medidas brazo y antebrazo	30
Ilustración 33 Fuerzas en motor del codo.....	32
Ilustración 34 Fuerza en motor hombro	33
Ilustración 35 Motor DC JGA25(Aliexpress, 2022b)	34
Ilustración 36 Tabla de características motor DC JGA25(Aliexpress, 2022b)	35
Ilustración 37 Motor DC ABHL 36GP(Aliexpress, 2022c).....	35
Ilustración 38 Tabla de características motor DC ABHL 36GP(Aliexpress, 2022c)	36
Ilustración 39 motor DC pinza(Iberobotics, 2022).....	36
Ilustración 40 Primer diseño brazo.....	37
Ilustración 41 Segundo diseño brazo	38
Ilustración 42 Mejora segundo diseño con incorporación de motores	39
Ilustración 43 Motor hombro en segundo diseño	40
Ilustración 44 Tornillo prisionero motor hombro segundo diseño	40
Ilustración 45 Tercer diseño brazo	41
Ilustración 46 Pieza interface hombro tercer diseño	42
Ilustración 47 Sección de hombro en tercer diseño	43
Ilustración 48 Sección base en tercer diseño	43
Ilustración 49 Sección codo en tercer diseño	44
Ilustración 50 Sección muñeca en tercer diseño	44
Ilustración 51 Diseño final brazo.....	45
Ilustración 52 Sección base en diseño final	46
Ilustración 53 Sección hombro en diseño final	46

Ilustración 54 Sección codo en diseño final	47
Ilustración 55 Hueco para colocación de tornillo prisionero en codo	47
Ilustración 56 Sección de muñeca en diseño final	48
Ilustración 57 Hueco para colocación de tornillo prisionero en muñeca	48
Ilustración 58 Pinza en diseño final	49
Ilustración 59 Final de carrera utilizado(Aliexpress, 2022a)	50
Ilustración 60 Final de carrera señalado en base	50
Ilustración 61 Tope de final de carrera señalado en base	51
Ilustración 62 Final de carrera señalado en rojo y tope en azul del hombro	51
Ilustración 63 Final de carrera y tope en hombro	52
Ilustración 64 Final de carrera señalado en rojo y tope en azul del codo	52
Ilustración 65 Final de carrera y tope en codo	53
Ilustración 66 Final de carrera señalado en muñeca	53
Ilustración 67 Tope final de carrera señalado en muñeca	54
Ilustración 68 Explosionado base	54
Ilustración 69 Explosionado hombro	55
Ilustración 70 Explosionado codo	55
Ilustración 71 Explosionado muñeca	56
Ilustración 72 Explosionado pinza	56
Ilustración 73 Explosionado final	57
Ilustración 74 DRV 8871(Aliexpress, 2022d)	58
Ilustración 75 Arduino Mega	59
Ilustración 76 Placa ESP32	60
Ilustración 77 Fuente de alimentación(Shopdelta, 2022)	61
Ilustración 78 Plano de conexionado	61
Ilustración 79 Piezas recién impresas	64
Ilustración 80 Piezas base	64
Ilustración 81 Base montada	65

Ilustración 82 Piezas hombro	65
Ilustración 83 Hombro montado	66
Ilustración 84 Piezas antebrazo	66
Ilustración 85 Antebrazo montado	67
Ilustración 86 Piezas brazo	67
Ilustración 87 Partes finales	67
Ilustración 88 Montaje final sin pinza	68
Ilustración 89 Pinza	68
Ilustración 90 Montaje final.....	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tabla despliegue componentes.....	63
---	----

1. INTRODUCCIÓN

En la industria actual la robótica está muy presente, sobre todo cuando hablamos de procesos de fabricación y automatización de los mismo, los robots cumplen una función fundamental, ya que realizan movimientos de gran precisión y velocidad, pudiendo ser controlados desde por un PLC, por un humano, por un ordenador o incluso trazando sus puntos de paso gracias a la ayuda de una inteligencia artificial.

Los robots más utilizados para dicho proceso son robots industriales o colaborativos. Dichos tipos cuentan con un elevado precio y son difícilmente accesibles para ciertos centros de enseñanza o aficionados al sector que desean iniciarse, explorar o aumentar sus conocimientos, además, existe un riesgo en el manejo de un robot industrial sin ciertos conocimientos previos. Por tanto, mediante el presente proyecto se pretende realizar el diseño de un pequeño brazo robótico de bajo coste y de reducidas dimensiones, sin riesgo de lesión por su uso. Centrándome en la parte mecánica y electrónica, para que este pueda ser programado libremente.

1.1. PALABRAS CLAVE

Brazo robótico, Hardware, Mecánica, Electrónica

1.2. ABSTRACT

In nowadays industry, robotics are very present, especially while talking about manufacturing and automatic processes, robots are in charge of a really fundamental role, since they perform movements of great precision and speed. They can be monitored by a PLC, a human or a computer, or even tracing their waypoints thanks to a complex but intuitive artificial intelligence.

Most of the robots used for this type of processes are industrial robots or cobots. These types of robots are very expensive and difficult to access for certain educational centers or robotics enthusiasts, who are willing to begin learning, explore or increase their knowledge. In addition, there is an existing risk on handling an industrial robot without certain previous knowledge. Therefore, through this project, it is intended to design a small, low-cost robotic arm with reduced dimensions, without the risk of any type wound during use. Focusing on the mechanical and electronic parts, so it can be freely programmed afterwards.

1.3. OBJETIVOS

Como se ha mencionado se va a realizar el desarrollo mecánico y electrónico de un brazo robótico, concretamente este contara con 5 grados de libertad incluyendo la herramienta.

En cuanto a la parte mecánica, se va a diseñar cada componente del robot hasta ser lo más funcional posible, además de la elección de actuadores, los cuales son los encargados de proporcionar el movimiento al brazo, teniendo estos que cumplir con las exigencias de la morfología del robot. Las principales premisas para el diseño son las siguientes:

- Posibilidad de la impresión 3D de la estructura del brazo.
- Diseño simplificado y fácil de montar.
- Actuadores de fácil montaje y de reducido coste.

El proceso de diseño va a ser de continua mejora, ya que se realizarán varios diseños y modificaciones hasta llegar al final, todas estas modificaciones se pueden dar en cualquier momento del desarrollo del trabajo, pudiendo ser en la fase de diseño o incluso en la fase de montaje y prueba, si se detectan fallos por un mal diseño. Además, se realizará un estudio previo de los antecedentes existentes para reunir información e ideas, partiendo así de una base sólida en la que construir e ir avanzando en el proyecto. Todo este proceso será reflejado en la memoria detallando las fases del diseño y las modificaciones llevadas a cabo.

El diseño electrónico se realizará en base a la elección de los actuadores, ya que cada tipo de actuador requiere un método de control diferente, por tanto, se estudiarán las posibilidades y se decidirá la que se cree que será la más favorable, dentro de la parte electrónica se va a buscar los componentes más aptos para realizar la función buscada, pero con el precio más deducido posible. En cuanto a la electrónica de control, esta será basada en torno a un microcontrolador el cual puede ser programado para el control y manejo del robot.

Todo ello culminará con la impresión y montaje final del robot, donde se pondrá a prueba los diseños y el trabajo realizado.

1.4. ANTECEDENTES DE BRAZOS ROBÓTICOS EDUCATIVOS

1.4.1. WLKATA Mirobot

WLKATA mirobot es un brazo robótico open-source de 6 grados de libertad, está basado en un robot industrial cuyo propósito principal es el educativo, ya que es una buena herramienta para personas desde principiantes hasta profesionales.



Ilustración 1 WLKATA Mirobot (WLkata, 2022)

Soporta numerosas formas de programación y distintas plataformas como ROS, Matlab, Python SDK o incluso Arduino entre otras.

Está construido principalmente con plástico ABS y aluminio, y para su movimiento principal está dotado de motores paso a paso, además, cuenta con distintos cabezales con los que podremos variar su funcionalidad. Unos de los cabezales más comunes, el de pinza, cuenta con un servo motor para su movimiento.

Entre sus características principales podemos destacar las siguientes:

El robot tiene un peso de 1.5 Kg y puede cargar con una carga máxima de hasta 400g, pero la carga estándar recomendada es de 250 g. Tiene una precisión de 0.2 mm, esto es gracias a sus motores paso a paso y por las reductoras que tiene incorporadas. Cuenta con gran variedad de interfaces de comunicación como puede ser WIFI, Bluetooth, USB y PLC, además de su amplio soporte a distintas plataformas de programación, nombradas anteriormente. Su controlador principal es un Arduino 2560.

Respecto a su alimentación, su potencia de entrada es de 12V a 4A DC.

En cuanto a sus distintos ejes, su rango y velocidad de movimiento es el siguiente:

Eje	Rango de trabajo	Velocidad máxima
1	-100° a 100°	31°/s
2	-60° a 90°	65°/s
3	-180° a 50°	28°/s
4	-180° a 180°	110°/s
5	-180° a 40°	33°/s
6	-180° a 180°	66°/s

1.4.2. Dobot magician

Dentro de un rango de precio similar al WLKATA miribot encontramos el Dobot magician, este brazo robótico, de reducidas dimensiones cuenta con 4 grados de libertad, ampliables a 5 si le incorporamos el accesorio de pinza manipuladora.



Ilustración 2 Dobot magician (Dobot, 2022)

Tiene un peso neto de 3.4 Kg y puede cargar con pesos de hasta 500g. Cuenta con una precisión de 0.2 mm, ya que en sus tres primeras articulaciones cuenta con motores pasos a paso y el giro de la pinza con un servomotor.

Sus interfaces de comunicación principales son USB, Bluetooth y WIFI.

Construido principalmente de plástico ABS y aleación de aluminio.

En cuanto a su alimentación, 12 v a 6.5A.

En cuando al movimiento, como se ha nombrado cuenta con motores paso a paso y un servomotor, los cuales cuentan con los siguientes rangos y velocidades.

Eje	Rango de trabajo	Velocidad máxima
1	-90° a 90°	320°/s
2	0° a 85°	320°/s
3	-10° a 95°	320°/s
4 (Servo)	-90° a 90°	480°/s

1.4.3. Lynxmotion AL5D PLTW

Brazo robótico de menos complejidad que los mostrados anteriormente, cuenta con 5 grados de libertad y está construido principalmente de aluminio. Su estructura destaca por su simplicidad en la que el movimiento está proporcionado por servomotores, los cuales están colocados en el eje de las articulaciones para proporcionar el movimiento de manera directa.



Ilustración 3 Lynxmotion AL5D PLTW (Lynxmotion, 2022)

Al contar solo con servomotores, los rangos de movimiento de todos los ejes son de 180 grados. Puede levantar masas de hasta 300g con el brazo extendido. Su precisión por eje es de 0.09 grados. Para su programación dispone de su propio software desarrollado por la marca y la interfaz de conexión es un puerto USB.

2. DESARROLLO

2.1. ESTADO DEL ARTE

Para un buen diseño y la toma correcta de las decisiones que se presenten durante el proyecto se han de estudiar las posibilidades existentes en el mercado, y así tener los conocimientos suficientes para la correcta elaboración del brazo robótico.

2.1.1. Tipos de configuraciones morfológicas

2.1.1.1. Cartesiana

Configuración caracterizada por las articulaciones prismáticas, las cuales hacen el posicionado en el espacio de trabajo. Cuenta con tres movimientos lineales, es decir, 3 grados de libertad de base, los cuales coinciden con movimientos en ejes X, Y y Z.

Configuración usada para aplicaciones con un gran campo de trabajo y que requieran gran exactitud.

El movimiento se realiza mediante interpolación lineal, este el tipo de trayectoria que sigue el manipulador cuando quiere desplazarse de un punto a otro. (Platea, 2016)

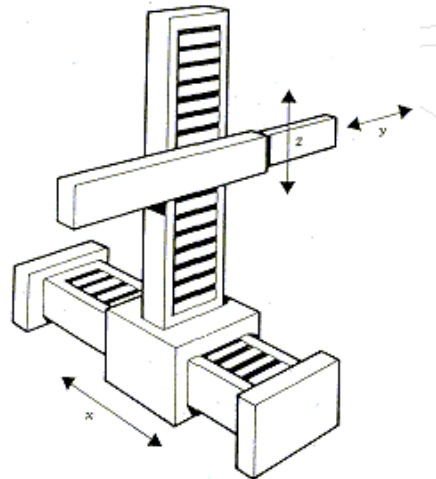


Ilustración 4 Configuración Cartesiana (Platea, 2016)

2.1.1.2. Cilíndrica

Para este tipo de configuración se cuenta con una base con movimiento de rotación y una articulación prismática par el movimiento de altura y radio, es decir, cuenta con un movimiento rotacional y dos

lineales, por lo que se cuenta con 3 grados de libertad de base, más los del manipulador.

De gran utilidad cuando se busca una adaptación en espacios redondos.

Al igual que en la configuración cartesiana, este se mueve por interpolación lineal y además se le incluye una interpolación por articulación, la cual será realizada por la base rotativa. (Platea, 2016)

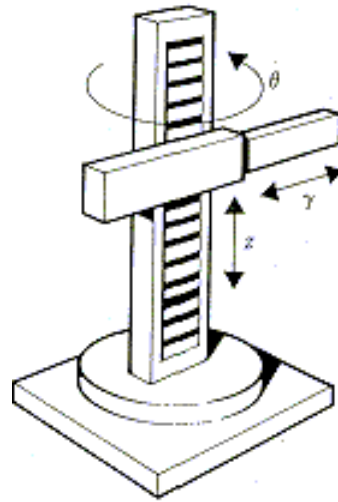


Ilustración 5 Configuración Cilíndrica (Platea, 2016)

2.1.1.3. Esférica

Estructura compuesta por dos juntas rotatorias y una prismática, esto permite apuntar hacia muchas direcciones. Cuenta con tres movimientos básicos, rotación, angular y radial.

Para el movimiento se usa la interpolación por articulación en sus ejes rotatorios e interpolación lineal en el eje prismático, efectuando así el movimiento de extensión y retracción. (Platea, 2016)

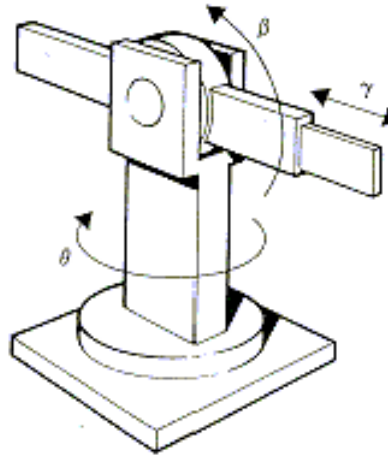


Ilustración 6 Configuración Esférica (Platea, 2016)

2.1.1.4. Angular

Configuración en la que se usa tres ejes de rotación, por lo que el espacio de trabajo que se genera es esférico. Dos de las articulaciones cuentan con movimiento angular y la restante, rotacional. Este diseño está basado en un brazo humano.

El movimiento generalmente se realiza mediante interpolación por articulación, tanto rotacional como angular. (Platea, 2016)

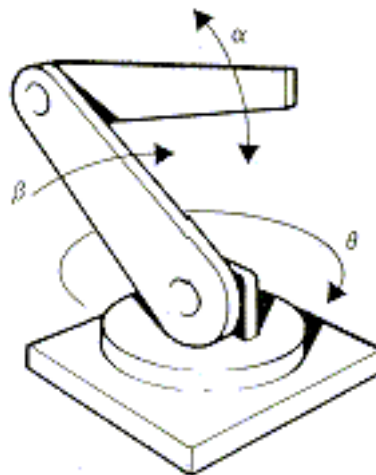


Ilustración 7 Configuración Angular (Platea, 2016)

2.1.1.5. SCARA

Configuración con gran similitud la cilíndrica, pero no cuenta con el eje prismático de la altura, ni con el que varía el radio, esto está sustituido por un eje angular y en la punta uno prismático para realizar la aproximación del manipulador. (Platea, 2016)

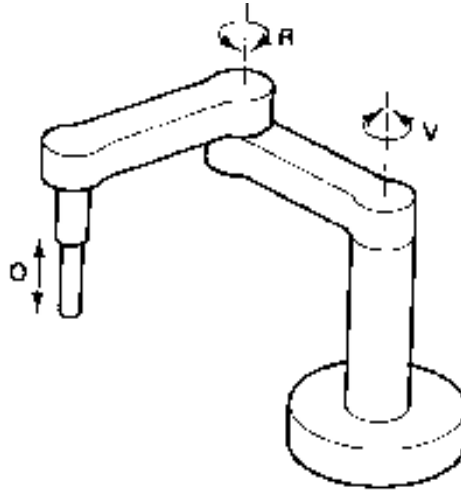


Ilustración 8 Configuración SCARA (Platea, 2016)

2.1.2. Partes de un brazo robótico

Una vez explicados los distintos tipos de configuraciones, y teniendo en cuenta que un brazo robótico industrial se basa en una configuración angular, se van a explicar las distintas partes del que está compuesto en cuanto a lo que morfología se refiere. Estas partes, llamadas eslabones, son los distintos elementos rígidos y están unidos entre sí por articulaciones, lo que permite el movimiento.

Como se ha comentado, la configuración angular está basada en un brazo humano, por lo que encontramos que, los eslabones reciben el nombre de brazo, antebrazo y mano y las articulaciones de hombro, codo y muñeca. (Santiago, 2020)

2.1.3. Tipos de actuadores

Los actuadores del robot son una de las piezas claves, ya que gracias a estos conseguimos el movimiento del brazo, se podrían comparar con los músculos de un ser humano. Existe variedad de motores, con diferentes características, formas de control, ventajas y desventajas, por lo tanto, para la elección de un actuador se tienen que barajar todos estos factores quedándonos finalmente con el actuador que más se ajuste a nuestro diseño y aplicación.

2.1.3.1. Motor paso a paso

Un motor paso a paso consiste un motor sin escobillas en el que su movimiento de rotación está dividido en un número de pasos, el cual depende de la construcción y estructura del motor, esto significa que su giro no se realiza de manera suave, si no que realiza saltos. Están compuestos de rotor y estator, el estator es la parte que se mantiene quieta, mientras que el rotor está montado en un eje junto con un cojinete y gira siguiendo el campo magnético generado por el estator, este campo magnético está producido por un conjunto de electroimanes a través de los cuales fluye una corriente. Por lo que el movimiento se produce ya que el rotor y el eje giran en el ángulo en el hay una menor oposición al flujo magnético. Concatenando el encendido de electroimanes del estator, el rotor va girando.



Ilustración 9 Motor paso a paso (bricogeek, 2022a)

Respecto al control de estos motores se encuentran varias opciones, desde las más sencillas, como pueden ser un potenciómetro con el que variamos la velocidad y un botón para el sentido de giro, construido todo ello a partir de componentes discretos como flip-flops, hasta controladores basados en Arduino o incluso circuitos integrados de un controlador y un procesador.

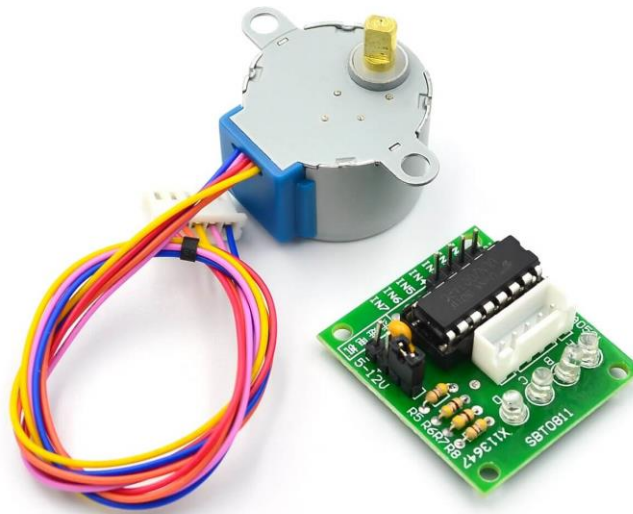


Ilustración 10 Motor paso a paso junto a controlador ULN2003 (Techlook, 2022)

Dentro de las principales ventajas en el uso de este tipo de motores encontramos que tiene una gran precisión, un fácil control de la posición y velocidad, además, de un alto par a bajas velocidades y al no contar con escobillas, una alta durabilidad, sin embargo cuenta con una serie de desventajas, como el continuo requerimiento de energía, tanto en movimiento como parado y el par mencionado anteriormente disminuye con el aumento de las revoluciones por minuto. Cuando hay una insuficiencia de par se produce un efecto llamado deslizamiento o pasos faltantes, requiriendo un sistema de retroalimentación con el que se compruebe el correcto funcionamiento del motor como puede ser un encoder.(TME, 2020)

2.1.3.2. Motor Brushed

Los motores brushed o su traducción en español, con escobillas, son un tipo de motor de corriente continua que data de 1800, se caracteriza por utilizar escobillas conectadas a un colector para realizar el cambio de polaridad del rotor. Están compuestos de cuatro partes principales, el estator, el rotor, el conmutador y las escobillas. Cuando se conecta una fuente de alimentación de CC a las escobillas las bobinas se energizan, convirtiéndose en un electroimán, produciéndoles así que giren alineando polo norte y polo sur de las mismas con el polo norte y sur del estator. A medida que el conmutador gira produce intercambios de la polaridad y en el campo magnético, produciendo un giro continuo.



Ilustración 11 Motor brushed (Amazon, 2022)

El control de un motor brushed es conceptualmente sencillo, requiriendo solo de una tensión fija de corriente continua y un conmutador, en el que al variar la tensión se produce un cambio en la velocidad de giro. Unos de los recursos más utilizados es el puente en H, mediante el cual, al polarizar determinados transistores del circuito se produce el giro en un sentido y otro del motor y para el control de velocidad se utiliza una señal PWM, para generar una tensión media gracias al ancho de pulso de la señal.

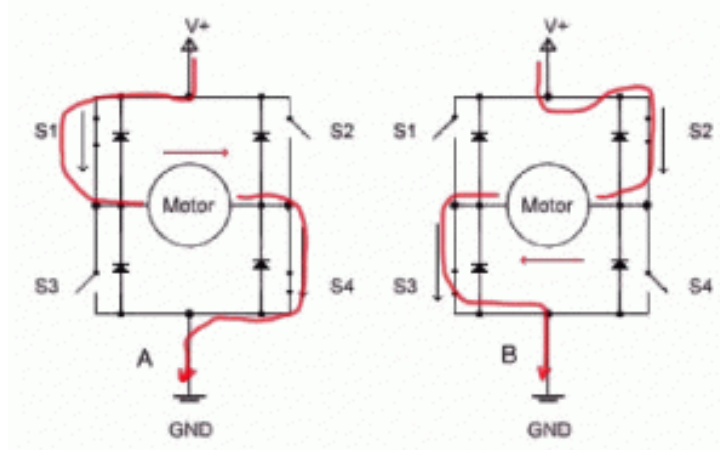


Ilustración 12 Puente en H (García, 2014)

Para una correcta realimentación en lazo cerrado será necesario el uso de algún sensor de posición angular, como puede ser un encoder o

potenciómetro. Con ello se conseguirá realizar un correcto control de posición y velocidad del motor. Existen módulos comerciales para estos motores los cuales incluyen ya integrado una reductora y un encoder, generalmente de efecto hall. (McGrady, 2016)

En resumen, este tipo de motor de CC cuenta con unas características interesantes para el precio por el que se puede encontrar, además de su sencillo control, pero por otra parte al contar con escobillas se produce un desgaste en las mismas, traduciéndose en una reducción de la vida útil.

2.1.3.3. Motor Brushless

Los motores brushless son un tipo de motor que se caracterizan por la ausencia de escobillas, esto tiene grandes beneficios, principalmente que, al carecer de ellas, no se le tengan que sustituir. Los primeros motores brushless fueron los motores de corriente alterna asíncronos, pero más adelante se crearon otros modelos como los de corriente continua, estos son principalmente en los que se va a centrar la explicación y análisis. Están compuestos por un estator y un rotor el cual gira según el impulso magnético generado por el estator. (Isaac, 2022)

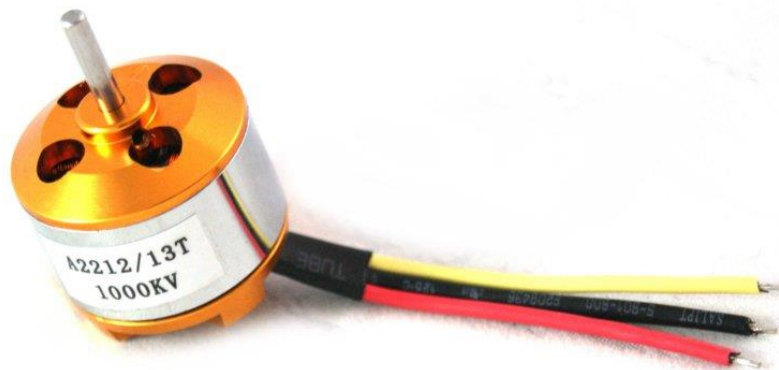


Ilustración 13 Motor brushless (Hetpro, 2022)

El control de un motor brushless es más complejo que por ejemplo el de un servomotor, de los que se hablara más adelante. Primero hay que entender que el bobinado de los motores brushless está distribuido por el estator, normalmente dividido en 3 fases separadas 120° entre sí, los pulsos de voltaje se van alternando entre las tres fases, de manera que con la concatenación de los pulsos se consigue el movimiento

diseño del motor, variando la longitud de cada pulso podemos modificar la velocidad de giro.

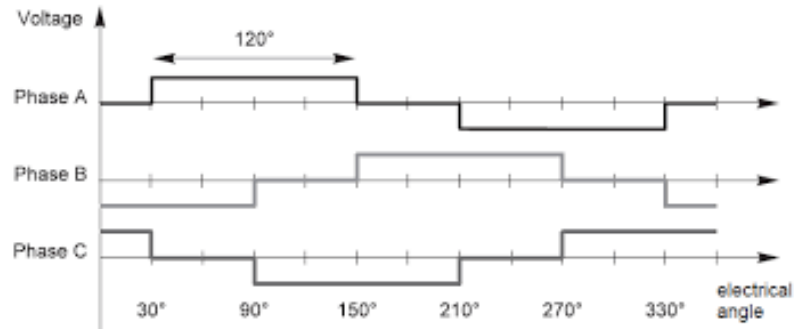


Ilustración 14 Pulsos fases motor brushless (Solchaga, 2015)

La alternación de voltajes entre cada fase ha de realizarse de manera externa e independiente mediante un controlador con el cual podremos variar la velocidad de giro del motor, un ejemplo de este es un ESC, Electronic Speed Controller, mediante el cual podemos cambiar la polaridad de los bobinados con un control sencillo mediante PWM.

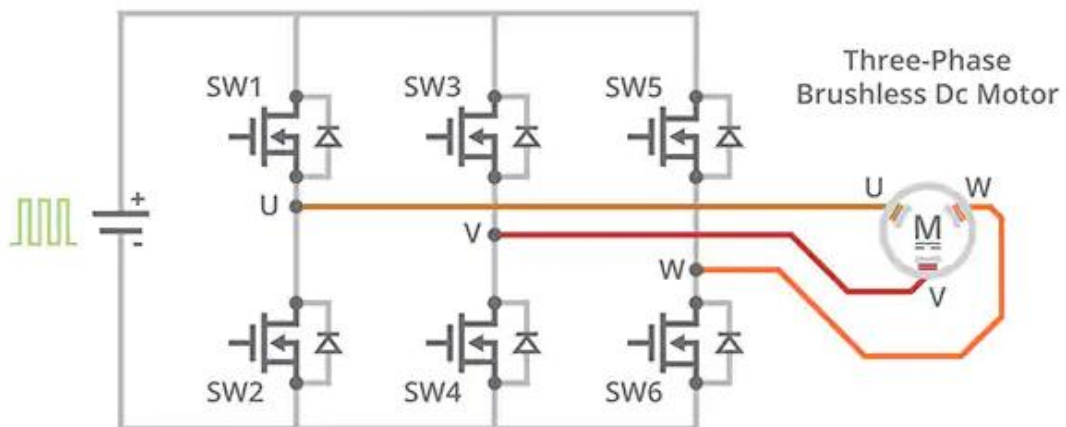


Ilustración 15 Esquema de control motor brushless (Digikey, 2022)

En adición, será necesario sensores que controlen la posición del motor, al igual que la velocidad. Los sensores empleados para ello pueden ser encoder o sensores de efecto Hall, dándonos una retroalimentación de la posición y velocidad del sensor, lo cual es primordial para un control eficaz. (Juanpere, 2022)

Se observan ventajas en el uso de este tipo de motores, como una gran relación de velocidad y par, lo cual será de gran utilidad, ya que al incluirle una reductora, la velocidad se verá reducida, al contrario que su par. Cuentan con una gran respuesta dinámica, esto ayudará a la hora de necesitar precisión, ya que su tiempo de respuesta será menor y podrá cumplir de manera más eficaz con las ordenes que le llegan del controlador. En cuanto a las desventajas, es dependiente de un driver o controlador el cual le mande los pulsos a cada fase del bobinado,

controlando así el giro y, además, en la mayoría de los casos se necesitará una retroalimentación, cerrando el ciclo, para así conseguir una eficacia en el control del motor, ya sea de velocidad o de posición. (Isaac, 2022)

2.1.3.4. Servo motor

Un servomotor es un actuador rotativo, el cual nos permite controlar su posición de manera sencilla gracias a la combinación de componentes por los que éste se conforma. Todo comienza por un motor simple, el cual está accionado por el servo controlador y el giro del motor está medido por un potenciómetro o un encoder, consiguiendo de esta manera un sistema de control en bucle cerrado con el servo controlador, además se cuenta también con un sistema de regulación formado por engranajes mediante el cual se podrá aumentar el par. (aula21, 2022)



www.pololu.com

Ilustración 16 Servomotor (tdrobotica, 2022)

El control de los servos se realiza desde un microcontrolador externo, mediante el cual se envía una señal cada 20 milisegundos y será recibida por el servo controlador, este es el encargado de interpretarla y en función del ancho de pulso de esa señal, el servo se desplazará a un ángulo en concreto. Por lo general, los servos tienen un ángulo de giro de 180°, por lo que si el ancho de pulso es inferior a 1.5 ms su ángulo será menor a 90°, mientras que si supera los 1.5 ms, su ángulo será superior. Podemos encontrar también servos de 360° de giro, los cuales

nos permitirán posicionarnos en cualquier posición, pero estos jamás podrán dar más de una vuelta.

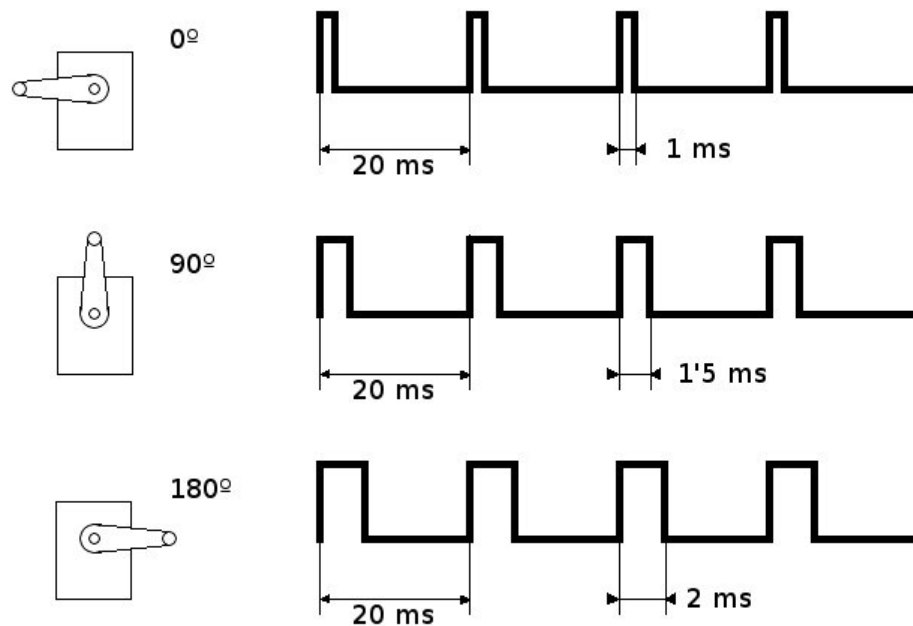


Ilustración 17 Anchos de pulso control servo (Maker, 2022)

La conexión de los servomotores generalmente suele ser de 3 cables, el de alimentación la cual está entre los 4 y 9 voltios, el de tierra y el tercero, de señal, por el que introducimos el pulso con el que controlamos los grados de giro. Existen servos en los que podemos encontrar un cable extra, este está destinado a una retroalimentación al control principal, es decir, nos devuelve la posición del servo leída por el encoder o potenciómetro que incluye y nos retorna el ángulo para poder tener en cuenta este parámetro y ver si coincide con la posición deseada y enviada.(areatecnologia, 2022)

Este tipo de actuadores, al igual que los motores paso a paso y los motores brushless cuentan con una serie de ventajas y desventajas, entre las principales ventajas encontramos aspectos como su fácil control y programación, necesitando solo de un microcontrolador el cual envía los pulsos necesarios, también su fácil montaje y simplicidad, ya que no necesitan de otros chips, estando todo incluido todo dentro del servo, desde el controlador, hasta el encoder para el control de posición(Alicia, 2020). Tienen un par bastante aceptable, aunque este varía según el modelo, gracias a la reductora de engranajes con la que ya cuentan. También cuentan con desventajas, como puede ser la incapacidad de dar más de una vuelta, estando limitados solo a su ángulo de giro, además que tendremos dificultades para elegir los componentes internos como el encoder o el controlador que deseemos, mientras que si esto lo montamos por nuestra cuenta podremos seleccionar los dispositivos que mejor hagan satisfacer nuestras necesidades, utilizando un motor de DC, un controlador para el motor y un encoder. Los servos, al depender su

posición de una señal de entrada, si queremos mantener su posición fija, se da una ligera vibración, ya que este continúa moviéndose hacia adelante y hacia atrás entre pulsos, lo que puede producir una ligera falta de precisión. (aula21, 2022)

2.1.4. Sensores

2.1.4.1. Sensores de posición angular

Una vez expuestos los tipos de actuadores que podemos usar en el diseño del robot, nos surge un problema, como sabemos la posición del motor, ya que sin esta el control del motor se haría a ciegas, desconociendo factores como la posición angular o la velocidad con las que se mueve cada articulación. Para ellos contamos con una serie de dispositivos con lo que generar una retroalimentación de la posición y lograr así un correcto funcionamiento del brazo, con un movimiento más fiel a lo que nos gustaría conseguir de él.

2.1.4.1.1. Encoder

Un encoder, también conocido como codificador, es un sensor electromecánico el cual genera señales digitales en respuesta al movimiento, es decir, son utilizados para medir tanto velocidad como posición angular.

Generalmente estos suelen ser ópticos, cuentan con un diodo LED que esta frente a un disco con ranuras el cual gira sobre un eje y un elemento fotosensible se encarga de detectar cuando la luz pasa a través de las ranuras del disco produciendo como señal de salida un tren de pulsos. (Encoder, 2022)



Ilustración 18 Encoder (RS, 2022)

Podemos distinguir entre los siguientes tipos de encoder:

2.1.4.1.1.1. Encoder incremental

También conocido como encoder relativo. Estos generalmente están configurados mediante un interruptor de haz de luz, es decir, un diodo LED que se coloca mediante un disco rotatorio con unas rendijas llamadas A, B y Z mediante las cuales pasará la luz que detectará el elemento fotosensible.

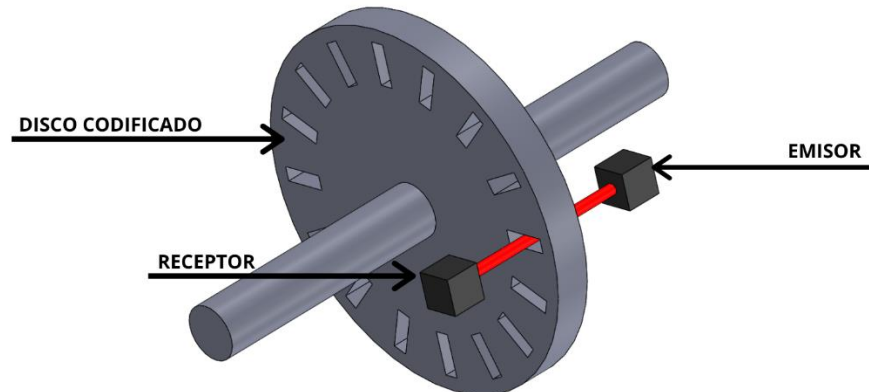


Ilustración 19 Funcionamiento interno encoder incremental (Euroencoder, 2022a)

La señal de salida del encoder son pulsos, el número detectado de estos pulsos es proporcional al ángulo de giro. Mediante las ranuras A y B atravesará la luz con un desfase de 90° en la señal de las ondas rectangulares de salida, gracias a esto podremos averiguar el sentido de rotación.

Por lo tanto para averiguar la posición se deberá realizar, mediante un circuito electrónico, el conteo de los pulsos generados. (Barrientos, 2020a)

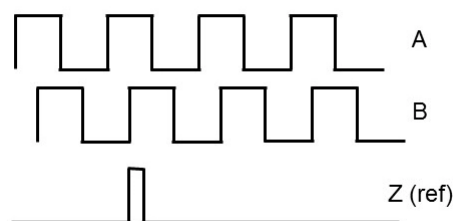


Ilustración 20 Señal de salidas encoder incremental (Celeramotion, 2022)

Uno de los principales problemas de este tipo de encoder es la configuración inicial, es decir, saber el punto desde el que se parte, para a partir de ahí empezar a sumar o restar grados en función del conteo de pulsos. Para ello contamos con el canal Z el cual manda un pulso cada 360° para configurar de tal manera una posición inicial desde la que empezar a contar pulsos. Si el encoder carece de este canal se tendrían

que buscar otro tipo de soluciones externas, como puede ser el uso de un final de carrera para la posición inicial o incluso un sensor inductivo. (Servo Motor Adjust, 2022)

2.1.4.1.1.2. Encoder absoluto

Un encoder absolutos, como su propio nombre indica, nos proporciona la posición absoluta del eje, esto es gracias a una señal de salida en códigos binarios digitales o en código Gray. Por lo tanto, no encontramos una acumulación de errores como se da en un encoder incremental a la hora de contar los pulsos, ya que la posición angular será dada en una serie de bits. A mayor número de bits que nos proporcione contaremos con una mayor resolución y precisión, esto será gracias al número de bandas concéntricas con los que cuenta el disco del encoder.

El funcionamiento básico es similar al de un encoder incremental, un diodo LED que emite luz y esta es detectada pasando a través del disco mediante un elemento fotosensible. (Barrientos, 2020a)

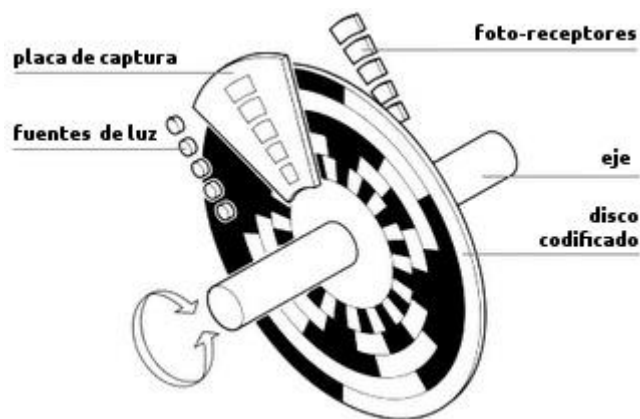


Ilustración 21 Funcionamiento interno encoder absoluto (Ibaindustrial, 2022)

La principal desventaja es la dificultad en su fabricación en miniatura, ya que, a mayor precisión, serán necesarias más bandas en el disco, aumentando de manera considerable su tamaño, aumentando también su cableado. Por otra parte, este siempre va a detectar la posición correcta, aunque lo desconectemos de la corriente eléctrica y no necesita una calibración inicial de posición para poder dar un valor de posición angular fiable. Por lo tanto, no necesitaría de elementos como finales de carrera, los cuales serían imprescindibles para el correcto funcionamiento de un encoder incremental. (Servo Motor Adjust, 2022)

2.1.4.1.1.3. Encoder efecto hall

Un encoder de efecto hall está basado en un sensor de efecto hall, este es un transductor el cual genera un voltaje de salida como respuesta a la presencia de un campo magnético. Para el cálculo de la posición y

velocidad el uso de estos sensores es similar al de los elementos fotosensibles de un encoder incremental, es decir, los sensores son colocados con una separación de 90° con respecto al circuito completo de giro y un imán induce en los sensores dos señales A y B, similares a las de un encoder incremental, mediante las cuales podemos averiguar el sentido de giro y con su conteo se puede saber la posición en forma de ángulo. En este tipo de encoder nos surge los mismos problemas que en el encoder incremental, ya que si perdemos la alimentación no sabemos la posición en la que se encuentra el eje hasta que no lo llevamos a una posición conocida, requiriendo de otros medios o sensores. La principal desventaja, a parte de la comentada anteriormente, es que este tipo de encoder cuentan con una escasa resolución. (Punto Flotante, 2022)

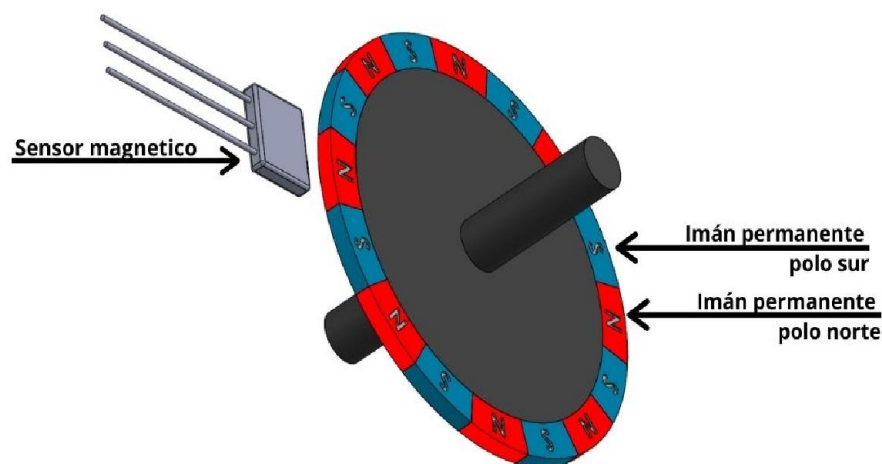


Ilustración 22 Funcionamiento interno encoder magnético (Euroencoder, 2022b)

2.1.4.1.2. Potenciómetro

Un potenciómetro es una resistencia variable en función de la posición de un eje, este está compuesto por un anillo circular resistivo y un contacto unido a dicho eje, el cual se desliza sobre el anillo. La resistencia entre uno de los extremos del anillo y el contacto es proporcional a la posición angular del eje. Mediante este principio se puede usar como un sensor de posición angular analógico, el cual estando alimentando con un voltaje entre los extremos del mismo, en la patilla del contacto nos va a devolver el voltaje proporcional a la posición del eje dentro de la capacidad de giro máxima del potenciómetro y he aquí uno de los grandes inconvenientes del uso de potenciómetros como este tipo de sensores, ya que generalmente estos giran en torno a 270° y para depender que articulaciones puede llegar a quedarse corto. Además, una de las cosas que hay que tener en cuenta es el uso de un potenciómetro suficientemente lineal para evitar la obtención de posiciones falsas, es decir, que la relación entre el ángulo y la resistencia sea idealmente lineal. (Barrientos, 2020a)

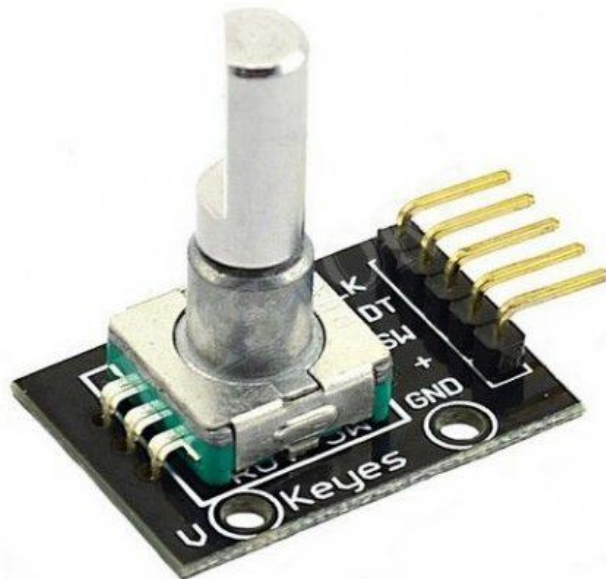


Ilustración 23 Potenciómetro (Makerelectronic, 2022)

2.1.4.1.3. Sensores inductivos de posición angular RVDT

Los sensores RVDT, siglas de transformador diferencial rotativo variable, son transductores de tipo inductivo los cuales miden la posición angular sin rozamiento, es decir, que no tienen desgaste indicado por tanto para aplicaciones con gran cantidad de operaciones, asegurando un correcto funcionamiento. (Sensing, 2022)



Ilustración 24 Sensor RVDT (Sensing, 2022)

Para entender su funcionamiento tenemos que ver su construcción, cuenta con un devanado primario y dos secundarios. La fuerza electromotriz inducida en el secundario es proporcional al desplazamiento rotatorio. Los dos devanados secundarios están ubicados de manera que la fuerza electromotriz tenga un desfase de 180° entre sí. Pueden darse tres condiciones de funcionamiento, cuando se da un posición nula, en el que el voltaje inducido en ambos devanados secundarios es igual, cuando se mueve en sentido horario, en el que se da una diferencia de voltaje inducido en devanados secundarios, produciéndose un potencial de salida diferencial positivo y por último el caso de movimiento antihorario, en el que la salida diferencial es negativa. (Mecafenix, 2022)

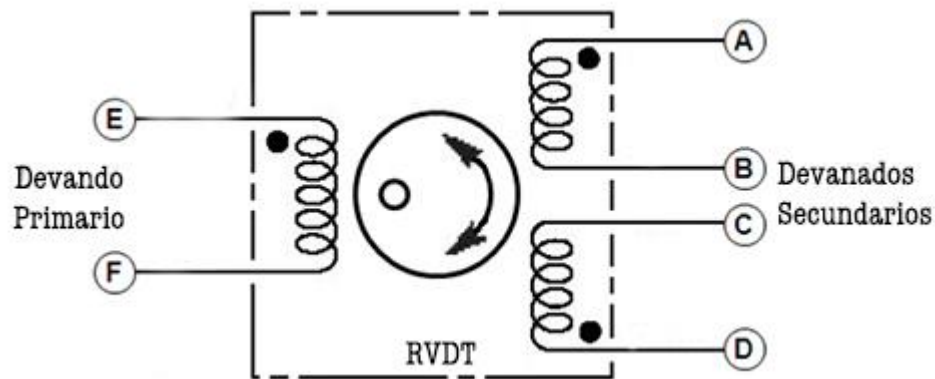


Ilustración 25 Devanador sensor RVDT (Mecafenix, 2022)

Podemos encontrar varias versiones de un RVDT en función de su señal de salida, los de DC en los que la electrónica viene ya integrada y los de AC en los que no se cuenta con la misma. Un ejemplo de la electrónica necesaria para hacer de interfaz de este tipo de sensor encontramos el chip LX3301A de Microchip.

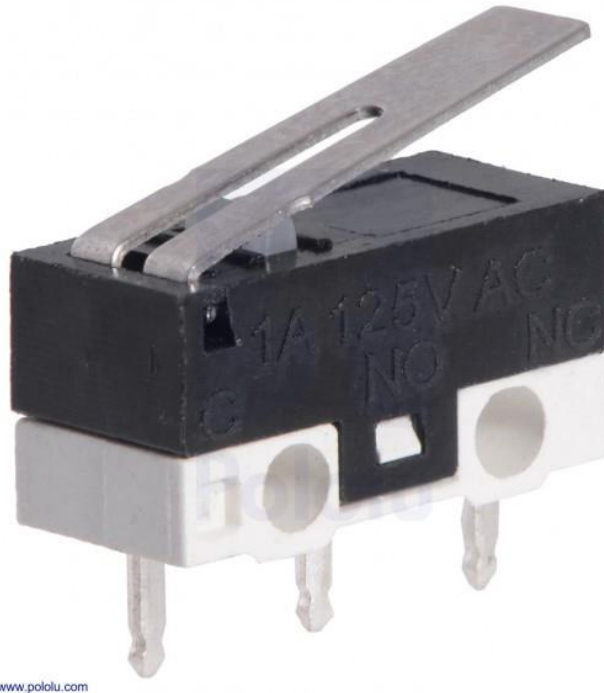
Este sensor cuenta con gran precisión a la vez de robustez y durabilidad, pero una de sus principales desventajas es la necesidad de acondicionar su señal mediante un chip que actúe de interfaz, al igual que su elevado precio cuando lo comparamos con otras alternativas. (Sensing, 2022)

2.1.4.2. Sensores de presencia.

Repasando los distintos tipos de sensores de posición angular se ha podido observar la forma de funcionamiento de los mismo además de distintas características, entre ellas la necesidad de un sensor extra, como es el caso del encoder incremental y del encoder de efecto hall, necesitando de un sensor con el que podamos llevar la articulación a una posición de inicio a partir de la cual empezar a contar pulsos del encoder, ya que este no es capaz de proporcionarnos una posición absoluta, si no que nos da una relativa con respecto a una posición inicial, por lo que la misión de este sensor es ubicar la articulación en esa posición de inicio. Este reinicio de posición se deberá realizar siempre que se encienda el robot, ya que mientras este estaba desconectado las articulaciones se han posición desplazar de su posición anterior, lo que ocasionaría un desajuste en la detección de la posición del eje. Para este fin contamos con diversos sensores

2.1.4.2.1. Final de carrera

Un final de carrera es un sensor que, mediante un accionamiento mecánico, es capaz de detectar la posición de un elemento móvil, este elemento necesita estar en contacto con el sensor para la detección de su llegada, es decir, no mide su posición de manera continua si no que es accionado mediante un pulsador cuando el objeto móvil está en la posición del final de carrera, pudiendo así determinar su posición en ese instante determinado. La salida del final de carrera es binaria, determinando si el objeto está en la posición o no. Los finales de carreras son dispositivos electromecánicos ya que están compuestos de una parte mecánica, que es el interruptor y el cabezal y una parte electrónica, con el contacto del interruptor y el circuito eléctrico pertinente para lograr una correcta señal de salida. (Novelec, 2022)



www.pololu.com

Ilustración 26 Final de carrera (bricogeek, 2022b)

2.1.4.2.2. Sensor capacitivo e inductivos

Un sensor capacitivo o inductivo es un interruptor el cual funciona sin contacto, es decir, son capaces de detectar sin contacto una presencia próxima de un material determinado.

En el caso de los sensores capacitivos el material puede ser desde papel hasta vidrio o metal, incluyendo fluidos como el agua, su funcionamiento se basa en un condensador que genera un campo eléctrico y este forma a su vez parte de un circuito resonador, de tal forma que cuando se acerca un objeto al campo, la capacidad disminuye y el circuito comienza a resonar.

Respecto a los sensores inductivos, estos se limitan a detectar la presencia de materiales metálicos. La detección de estos objetos se realiza mediante una bobina la cual genera un campo magnético y cuando un objeto se acerca fluye una corriente de inducción. Conforme el objeto se acerca aumenta esta corriente, lo que produce un aumento de la oscilación de la carga del circuito. (Mecafenix, 2017)

La distancia de detección de estos sensores varía en función del material del objeto a detectar, pero para nuestra aplicación no interesaría una distancia lo más pequeña posible para evitar así, en la medida de lo

posible, los errores de posición producido por no tomar una posición inicial de manera correcta. (Keyence, 2022)



Ilustración 27 Sensor capacitivo e inductivo (Secoin, 2022)

2.1.5. Tipos de transmisión

2.1.5.1. Transmisión por correas y poleas

La transmisión por correas y poleas permite transferir movimiento entre ejes paralelos, que se cruzan o cuando queremos transmitir movimiento a un eje desde un punto relativamente lejano, además, son capaces de absorber choques al ser elásticas. Cuentan con un buen rendimiento, aunque se puede producir algo de deslizamiento comparado con otras formas de transmisión. Se pueden encontrar distintas configuraciones, como correa plana, trapezoidal, dentada, redonda o de eslabones. Cada una de ellas está pensada para aplicaciones diferentes en las que se exijan una características en específico. (López Álvarez, 2021)



Ilustración 28 Transmisión por correa (Directindustry, 2022)

2.1.5.2. Transmisión por engranajes

La transmisión por engranajes es uno de los sistemas más utilizados. Existen distintas formas de intercambio de movimiento entre engranajes, entre los que podemos encontrar engranajes rectos, engranajes cilíndricos helicoidales, engranajes cónicos y engranaje de tornillo sin fin, entre otros. En todos estos tipos de transmisión por engranajes varían las características como pueden ser velocidad o relación de transmisión, además de par, potencia y rendimiento, pero por lo general las transmisiones por engranajes se caracterizan por garantizar un movimiento exacto del eje, evitando deslizamientos entre engranajes y asegurando un funcionamiento correcto, esto siempre que no lo llevemos a sus límites de funcionamiento, el cual dependería de factores como el material de fabricación o su robustez. Además, se puede destacar su durabilidad, factor que va a depender también del material de fabricación empleado, y su gran capacidad para transmitir un alto par. Este tipo de transmisión lo vamos a encontrar en elementos como cajas reductoras para los motores, las cuales van a ser imprescindible para el funcionamiento de nuestro robot. (López Álvarez, 2021)



Ilustración 29 Transmisión por engranaje (Ingemecanica, 2022)

2.1.5.3. Transmisión por paralelogramo

Este tipo de transmisiones se da cuando tenemos un motor en la base y queremos transmitir el movimiento a la siguiente articulación, para ello se emplea un paralelogramo formado por barras macizas de tal manera que se asegura que el ángulo superior derecho del paralelogramo será igual al ángulo inferior izquierdo, obligando a que el brazo del robot bascule a la vez que lo hace el antebrazo, formando así una transmisión rígida. (Barrientos, 2020b)

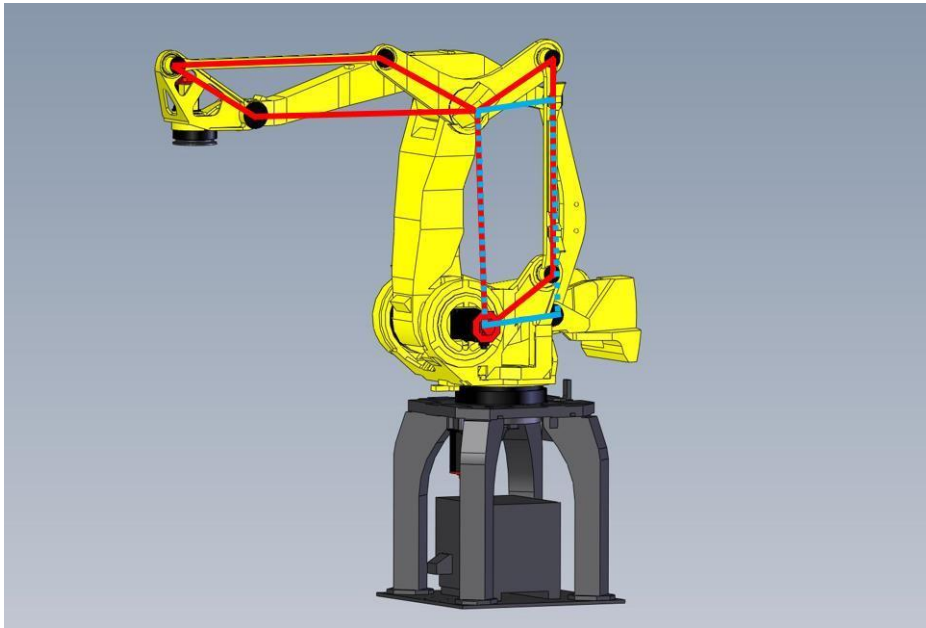


Ilustración 30 Transmisión por paralelogramo (Arroyo Belmonte, 2018)

2.1.5.4. Transmisión directa

Se considera transmisión directa cuando para el movimiento del eslabón no se requiere de transmisión ni de reductor, es decir, el eje del motor está directamente conectado con el siguiente eslabón. Este tipo de transmisión se puede observar en robot de tipo SCARA, que al no tener que levantar en vertical el peso del brazo, ya que los movimientos de este tipo de configuración son paralelos al suelo, los motores pueden funcionar bien a velocidades lentas.

En este tipo de transmisiones se disminuye fracciones, zonas muertas y errores producidos por una transmisión traduciéndose en movimientos más rápidos y precisos. Como contraparte encontramos que la resolución de nuestro captador de posición, como puede ser un encoder, va a ser menor, al no contar con una reductora. (Barrientos, 2020b)

2.2. DISEÑO MECÁNICO

Durante esta sección se va a relatar el proceso seguido hasta llegar a la versión final del brazo robótica, partiendo de las especificaciones iniciales y mejorándolo conforme este va tomando forma y según se requiera para su adecuado funcionamiento. Además, se desarrollará la elección de los motores y los cálculos de los mismos.

Como se ha comentado en los objetivos, se desea construir un robot de 5 grados de libertad cuya configuración será similar a la de la siguiente imagen.

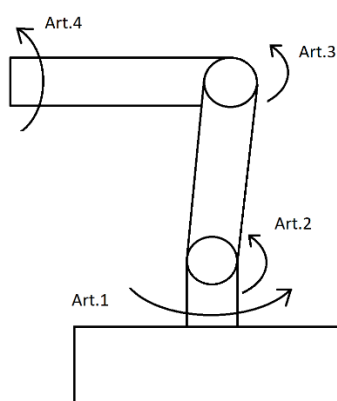


Ilustración 31 Grados de libertad

En este proceso se han desarrollado varios diseños, de los cuales se han sacado unas conclusiones para, a través de los errores cometidos, llegar a una versión final que sea lo más funcional y adecuada posible.

2.2.1. Especificaciones iniciales.

La finalidad principal de este brazo robótico es que una persona con intereses afines a la robótica pueda aprender a programar un brazo robótico con un prototipo que no tenga peligro por dimensiones y fuerza de los motores. Esta premisa la debemos tener presente a la hora de establecer las especificaciones del brazo. Además, se desea que el diseño permita un fácil montaje del brazo y sus actuadores, los cuales deberán tener un precio reducido y asequible para que el coste final sea accesible para todo tipo de público.

El primer punto son las dimensiones de cada eslabón y distancia entre articulaciones, las dos medidas más importantes son las del brazo y las del antebrazo y que son los eslabones más grandes y que más van a afectar a la hora del peso que carguen los motores. Se desea un tamaño

reducido por lo que se opta por un tamaño de brazo y antebrazo de unos 15 cm aproximadamente.

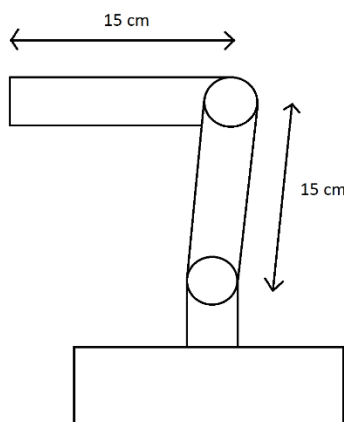


Ilustración 32 Medidas brazo y antebrazo

Otro de los puntos es la fabricación de robot, ya que dependiendo el método el diseño puede variar para adaptarse. El método será mediante impresión 3d con materiales como el PLA o el PETG.

No se le va a requerir al robot levantar ningún peso específico, por lo que no se tendrá en cuenta pesos extra durante los cálculos, no obstante, se espera que este sea capaz de mover objetos de peso y tamaño reducido.

Por último, como se ha comentado, el robot contara con 5 grados de libertad, comenzando por la base, luego el hombro, codo, muñeca y por último la pinza situada en el extremo del antebrazo.

2.2.2. Elección de los actuadores.

En el apartado de estado del arte se ha repasado todos los tipos de motores y sensores, encontramos numerosas opciones como puede ser motores paso a paso, servomotores y motores de DC en el caso de los actuadores, todos con sus pros y sus contras, pero de los tres se va a optar por los motores de DC ya que, junto con el sensor de posición elegido, puede ser la mejor opción debido a su fácil control y buenas características. El sensor de posición será un encoder incremental que será ayudado de un final de carrera para encontrar la posición inicial en la cual se empezaran a contar los pulsos del encoder. La decisión final se tomado en parte por la facilidad en cuanto a diseño que supone la disponibilidad de conjuntos con el motor de DC montado con un encoder incremental y la correspondiente reductora para el motor, además de que con esta opción se consiguen un fácil control y una buena retroalimentación que en conjunto buscara la mayor precisión posible para cada articulación.

2.2.2.1. cálculos para el par de los motores

Para el cálculo me he centrado en los dos puntos que más par requieren del brazo, el hombro y el codo, además, de realizar el cálculo en el caso más crítico, que es cuando el brazo este completamente paralelo al suelo, es decir, estirado en horizontal ya que además de la inercia que genera el peso del bazo al acelerar se deberá tener en cuenta también la gravedad, si el par del motor es mayor al par requerido en este punto significa que el motor no tendrá problema para mover la articulación.

Los datos básicos que se deben conocer son las dimensiones y pesos del brazo. La distancia entre hombro y codo (brazo) es de aproximadamente 12 cm. La distancia entre el codo y la muñeca (antebrazo) es de en torno a 13 cm. El peso destinado a los motores será de en torno a 100 gramos, pero lo redondeamos a 150 gramos en el caso del antebrazo y 250 en el brazo para tener en cuenta también el peso de cables y estructura de PLA. Se cuenta con dos motores, uno en el codo y otro en la muñeca, los cuales van a ser las principales masas a levantar. La velocidad de los motores será de 60 rpm aproximadamente y vamos a suponer que acelera en 1 segundo.

Resumiendo contamos con los siguientes datos:

Longitud brazo	12 cm
Longitud antebrazo	13 cm
Peso motor	100 g
Peso antebrazo	150 g
Peso brazo	250 g
Velocidad del motor	60 rpm / 1 rps
Tiempo de aceleración	1 seg

Comenzamos con el cálculo del par del codo, encontramos dos fuerzas, la generada por la gravedad y la que se genera por la inercia de acelerar.

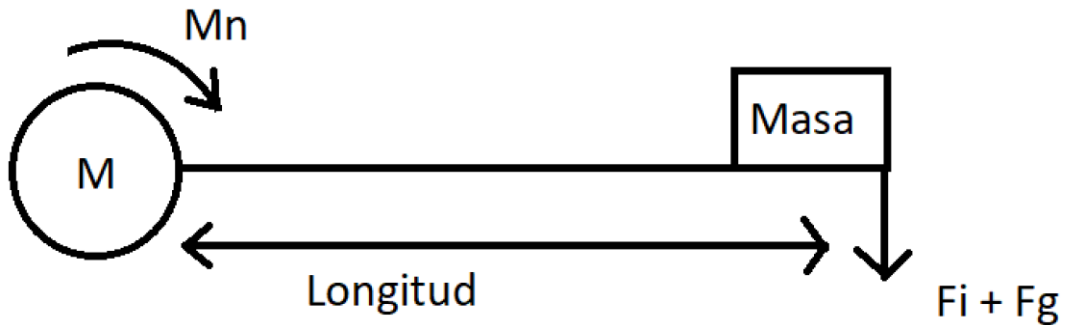


Ilustración 33 Fuerzas en motor del codo

La fuerza de inercia es la masa de brazo, 150 g, por la aceleración que este sufre.

$$F_i = M \cdot a = M \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot L_{Antebrazo}}{t_a} = 0.150 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot 0.13}{1} = 0.122 \text{ N}$$

La fuerza de gravedad es la masa del antebrazo por la gravedad.

$$F_g = M \cdot g = 0.150 \cdot 9.8 = 1.47 \text{ N}$$

Para el par final del motor vamos a sumar las dos fuerzas y se multiplica por la longitud del antebrazo.

$$Nm_1 = (F_i + F_g) \cdot L = (0.122 + 1.47) \cdot 0.13 = 0.206 \text{ Nm}$$

Por último, para el cálculo del par necesario del motor del hombro, se ha de tener en cuenta que contamos con dos grandes masas, el motor del codo y el de la muñeca, aunque a estas masas se les sumará las de la estructura y cableado, por tanto, se estudiará la situación más exigente para el motor, con el brazo estirado paralelo al suelo. Se observan como esos dos puntos de masa ejercen par sobre el motor debido a la fuerza de gravedad y a la de inercia que generan al acelerar.

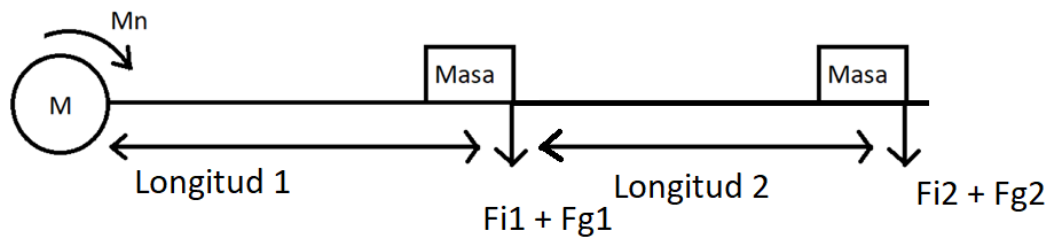


Ilustración 34 Fuerza en motor hombro

Comenzamos calculando las fuerzas de gravedad, multiplicando cada masa por la gravedad.

$$F_{g1} = m_1 \cdot g = 0.25 \cdot 9.8 = 2.45N$$

$$F_{g2} = m_2 \cdot g = 0.15 \cdot 9.8 = 1.47N$$

Continuamos con las fuerzas de inercia.

$$F_{i1} = M1 \cdot a = M1 \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot L_{brazo}}{t_a} = 0.25 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot 0.12}{1} = 0.188 N$$

$$F_{i2} = M2 \cdot a = M2 \cdot \frac{rps \cdot 2\pi \cdot (L_{brazo} + L_{antebrazo})}{t_a} = 0.15 \cdot \frac{1 \cdot 2\pi \cdot (0.12 + 0.13)}{1} = 0.235 N$$

Por último, calculamos el par multiplicando cada fuerza por su distancia correspondiente al motor.

$$Nm_2 = (F_{i1} + F_{g1}) \cdot L1 + (F_{i2} + F_{g2}) \cdot (L2 + L1) \\ = (2.45 + 0.188) \cdot 0.12 + (1.47 + 0.235) \cdot 0.25 = 0.742 Nm$$

Por lo tanto, se observa como para el motor del codo se necesitará un pico de par de 0.206 Nm, mientras que el del hombro será mucho superior, de 0.742 Nm.

2.2.2.2. Motores escogidos

Con los datos obtenidos del par necesario en codo y hombro se ha realizado una extensa búsqueda de motores que cumplan dichas características y además que cuenten con un encoder integrado. Finalmente se ha optado por lo siguiente:

Para el caso de un motor con par mayor a 0.2 Nm, se ha escogido un motor de 12V y 60 rpm que cumple las características nombradas anteriormente. El motor es el JGA25-370-103K.



Ilustración 35 Motor DC JGA25(Aliexpress, 2022b)

Cuenta con un sensor de efecto hall de 11 pulsos por vuelta que multiplicador por su reductora de 1:103 lo convierte en 1133 pulsos por vuelta, además su par nominal es de 0.2 Nm, lo que es igual al requerido, pero el par de pico es de 0.7 Nm por lo que en caso de requerir un empuje extra el par no se quedaría corto. En su hoja de características encontramos la siguiente tabla:

Model	No load			Rated			Stall			Weight	Lsize
	Rated voltage	Speed	Current	Speed	Current	Torque	Torque	Current			
	V	±10%RPM	A	±10%RPM	A	KG. CM	KG. CM	A	g		
JGA25-370-4.4K	12	1360	0.07	1046	0.3	0.1	0.4	1.8	83	18	
JGA25-370-9.6K	12	620	0.07	477	0.3	0.2	0.9	1.8	83	17.5	
JGA25-370-21.3K	12	280	0.07	215	0.3	0.4	2	1.8	86	19	
JGA25-370-35.5K	12	170	0.07	131	0.3	0.69	3.3	1.8	88	21	
JGA25-370-46.8K	12	130	0.07	100	0.3	0.9	4.4	1.8	88	21	
JGA25-370-78K	12	77	0.07	59	0.3	1.5	5.5	1.8	90	23	
JGA25-370-103K	12	60	0.07	46	0.3	2	7.3	1.8	90	23	
JGA25-370-130K	12	46	0.07	35	0.3	2.5	9.2	1.8	89	25	
JGA25-370-171K	12	35	0.07	27	0.3	3.3	Ban stall		89	25	
JGA25-370-226K	12	26	0.07	20	0.3	4.4		89	25		
JGA25-370-377K	12	16	0.07	12	0.3	7.3		91	27		
JGA25-370-500K	12	12	0.07	9	0.3	9.7		91	27		

Ilustración 36 Tabla de características motor DC JGA25(Aliexpress, 2022b)

Para el caso en el que se requiere par mayor a 0.75 Nm se escoge el motor ABHL 36GP- 555.



Ilustración 37 Motor DC ABHL 36GP(Aliexpress, 2022c)

Alimentado con 12V y una velocidad de giro de 60 rpm cuenta con un par nominal de 4 Nm y un par de pico de 6 Nm lo que hace que cumpla con los requisitos marcados. Cuenta con un encoder de efecto Hall de 17 pulsos y con una reductora ratio 1:100, lo que hace 1700 pulsos por vuelta en el eje de salida. En su hoja de características encontramos:

Voltage:DC12.0V max power 30W 1260#								
RATIO	1: 5.2	1: 19	1: 27	1: 51	1: 100	1: 139	1: 264	1: 515
No-load current(mA)	≤400	≤400	≤400	≤400	≤400	≤400	≤400	≤400
No-load speed(rpm)	1150	315	220	115	60	43	23	11.5
Rated torque(Kg.cm)	3.00	7.0	10.0	20.0	40.0	50.0	50.0	50.0
Rated speed(rpm)	880	240	165	90	45	32	20	10.5
Rated current(A)	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤1.7	≤1.5
Stall torque(kg.cm)	≥7	≥25	≥30	≥50	can't exceed 60kg.cm			
Stall current(A)	≤9.5	≤9.5	≤9.5	≤9.5	≤9.5	≤9.5	≤9.5	≤9.5
planetary drive poles	1stages	2stages			3stages			4stages
Decelerator length(mm)	26.5	34.5			42.5			50.5

Ilustración 38 Tabla de características motor DC ABHL 36GP(Aliexpress, 2022c)

Las articulaciones de la base y de la muñeca no tendrán que vencer la gravedad por lo que se ha decidido incorporar el motor JGA25-370-103K de 0.2 Nm a las mismas.

Para la pinza se ha optado por un pequeño motor de DC. El elegido ha sido el microservo SG90 debido a sus características más que suficientes para la tarea que desempeñara y su reducido precio y dimensiones.



Ilustración 39 motor DC pinza(Iberobotics, 2022)

2.2.3. Diseño inicial

Para el diseño, a parte de las especificaciones nombradas anteriormente, se toma la decisión de que los actuadores irán colocados en el eje de cada articulación, para hacer de esa manera una transmisión más sencilla, evitando un montaje difícil. Con todo esto se procede a realizar un primer diseño.

Basándome en antecedentes observados durante la realización de trabajo comienzo un proceso de diseño que se materializa con la primera versión del brazo.

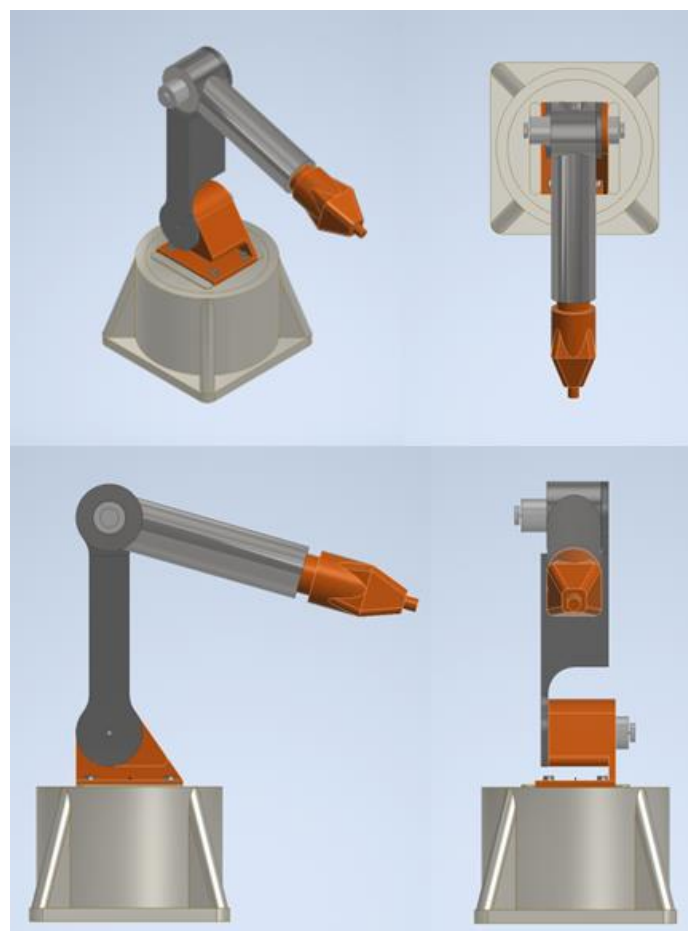


Ilustración 40 Primer diseño brazo

Tras un análisis de este primer diseño, llego a la conclusión de que es poco práctico, ya que no cuenta con espacio suficiente para la colocación de los motores y tiene partes de difícil montaje, como pueden ser los tornillos de la base, además, la fijación a los motores no es correcta. Con estos errores anotados se realiza un segundo diseño, con la intención de que este pueda albergar los motores y demás

componentes sin problema y además que su montaje sea lo más fácil e intuitivo posible. Se comienza con uno más conceptual, con el que se puede observar la forma general del brazo.

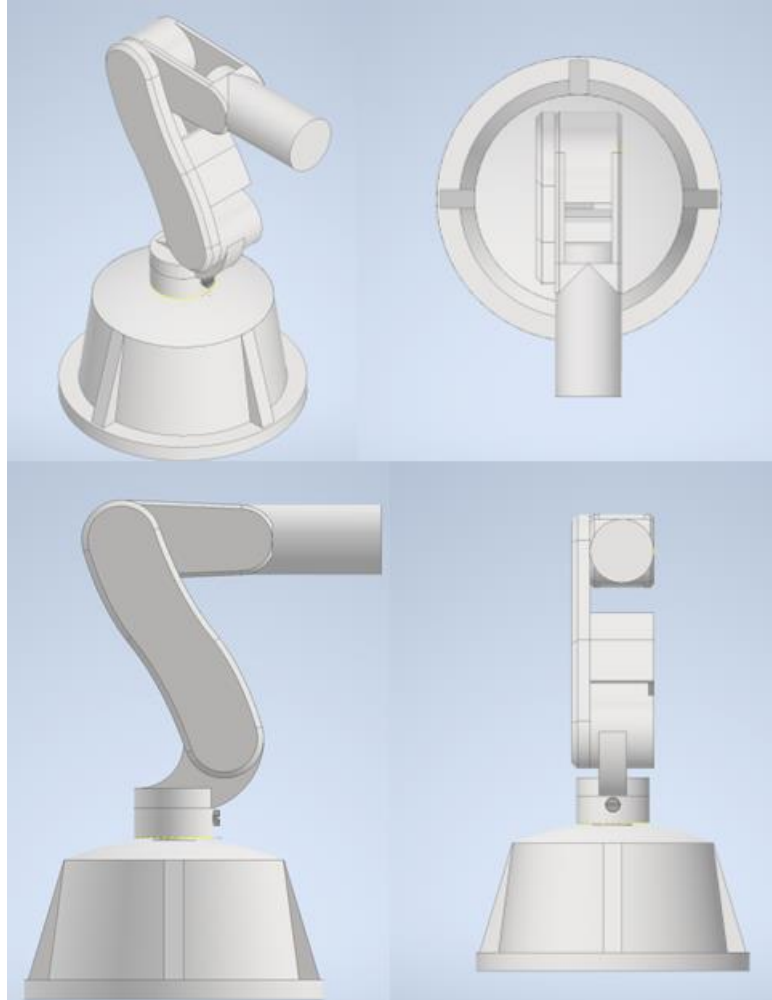


Ilustración 41 Segundo diseño brazo

El siguiente paso es plantear como va a estar sujeto cada motor y a su vez como se va a fijar el eje del motor al siguiente eslabón. La principal opción es que la articulación que se mueve gracias a cada motor este fijada de manera directa al eje del mismo, teniendo que soportar así el peso.

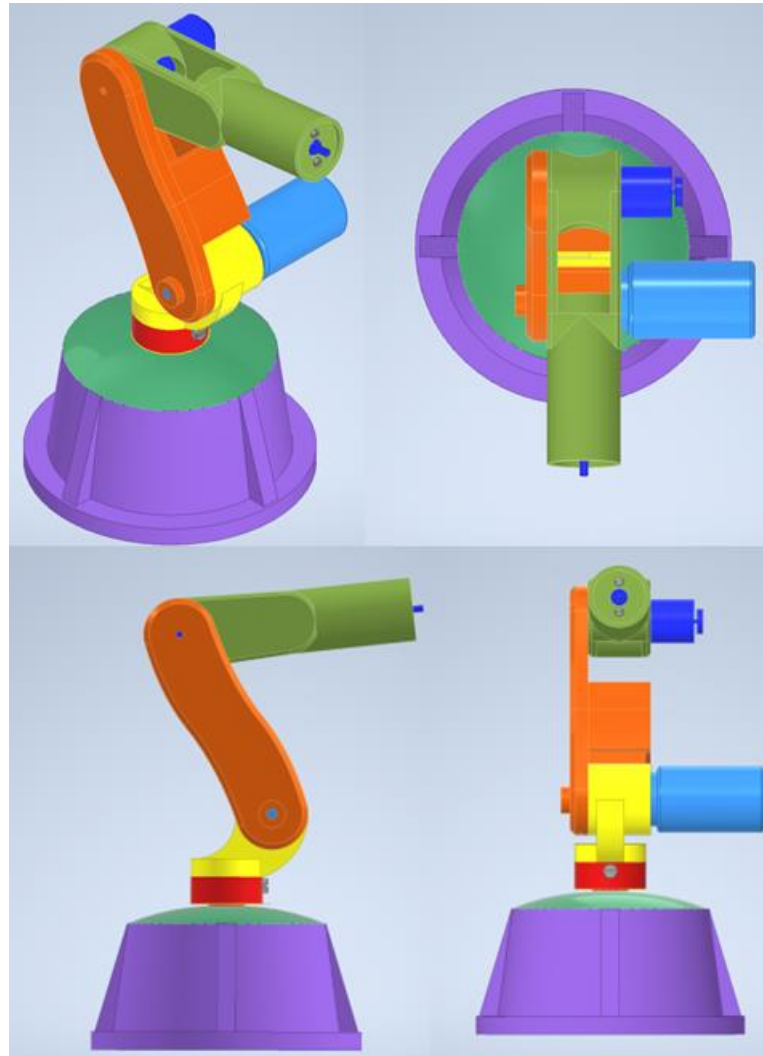


Ilustración 42 Mejora segundo diseño con incorporación de motores

La fijación de los motores se realizaría mediante los agujeros roscados con lo que cuentan los mismo y gracias a un tornillo quedaría sujeto en el eslabón anterior y con un tornillo pasante se fijaría el siguiente eslabón a al eje del motor que le produce el movimiento. Esto se puede observar realizando una sección en el hombro.

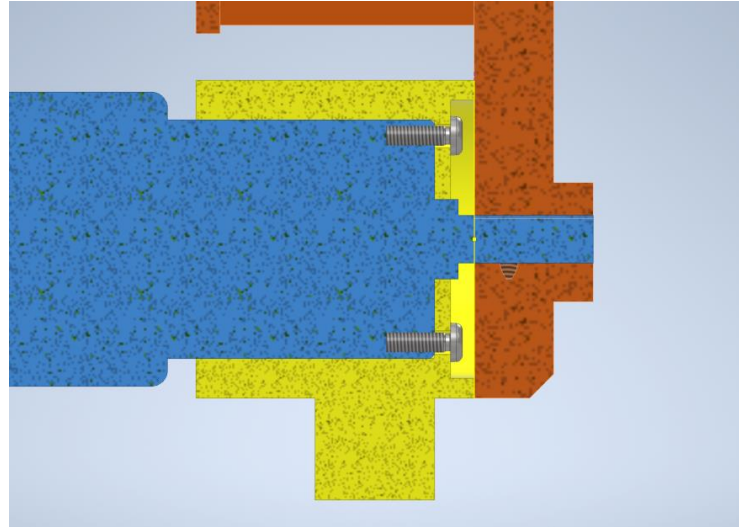


Ilustración 43 Motor hombro en segundo diseño

En azul se observa el motor, en amarillo el eslabón al que el motor está fijo y en naranja el eslabón el cual el motor le produce el movimiento, de esta manera se observa cómo se quedaría fijo el motor.

La fijación al eje la vemos en la siguiente imagen la cual nos muestra el agujero para el tornillo que fijaría el eje.

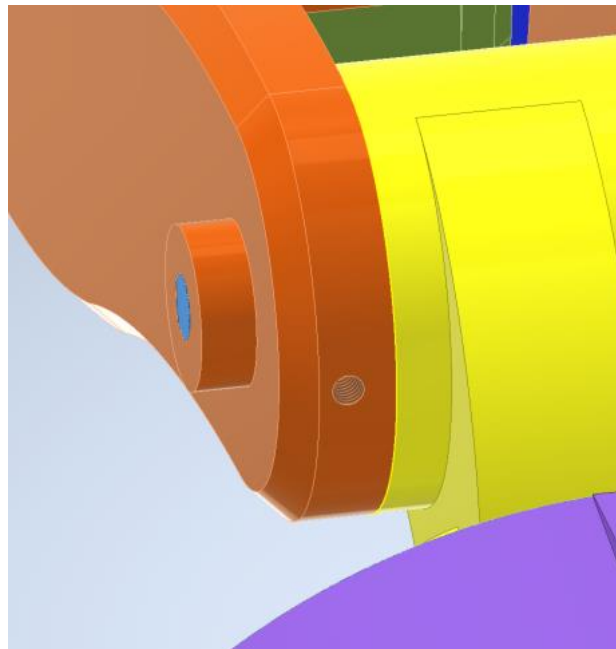


Ilustración 44 Tornillo prisionero motor hombro segundo diseño

Se analiza este diseño obteniendo una serie de conclusiones; el principal error es dejar que el peso del brazo recaiga directamente sobre

el eje del motor, esto conllevaría una pérdida considerable de la potencia del mismo, además de hacer que no trabaje de la manera más adecuada, por otra parte, la fijación a los ejes conceptualmente es la correcta, pero no se había llevado a cabo de manera que sea funcional. Con estas conclusiones se toma la decisión de incorporar rodamientos al diseño del brazo, esto ayudará a los motores, ya que favorecerá el movimiento de cada articulación y evitará que el peso recaiga sobre los ejes de cada motor.

2.2.4. Mejora del diseño

Los diseños iniciales han servido para aprender de errores que pueden surgir durante esta fase, gracias a ellos se realizan unas mejoras en el diseño que lo van transformando cada vez más en una versión final que pueda ser funcional. Uno de los puntos que se modifican es el uso de rodamiento, por lo que se realiza un rediseño de manera íntegra de cada articulación, se incorporan unos rodamientos DIN 625 con medidas 10x19x5 milímetros con lo que se asegura que el eje del motor pueda entrar en el orificio del rodamiento.

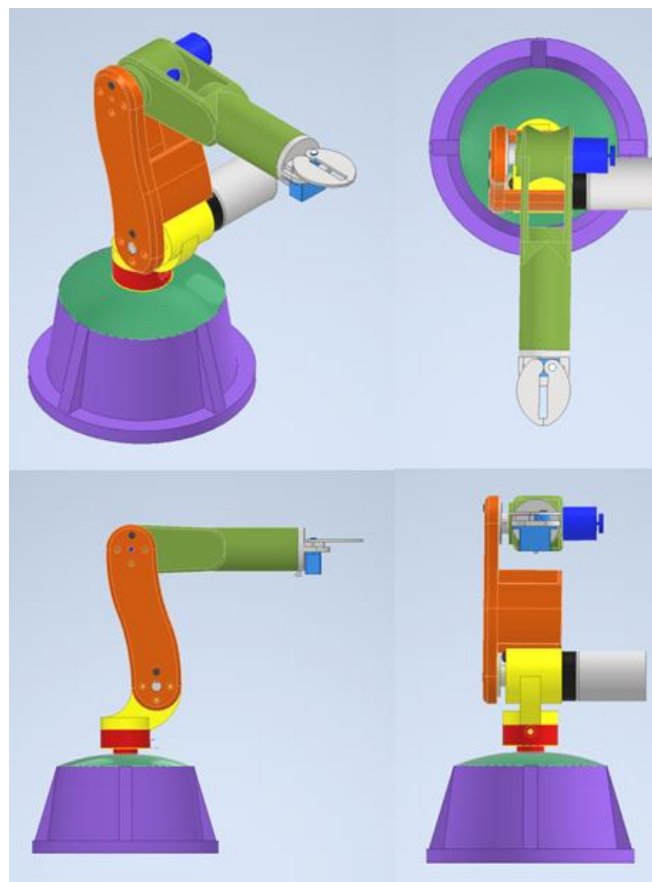


Ilustración 45 Tercer diseño brazo

Se incorpora el elemento final, una pinza, la cual ira controlada por un servomotor, además, se diseña una pieza de unión que realizara la función de interfaz entre eje y rodamiento y el eslabón que mueve el motor.

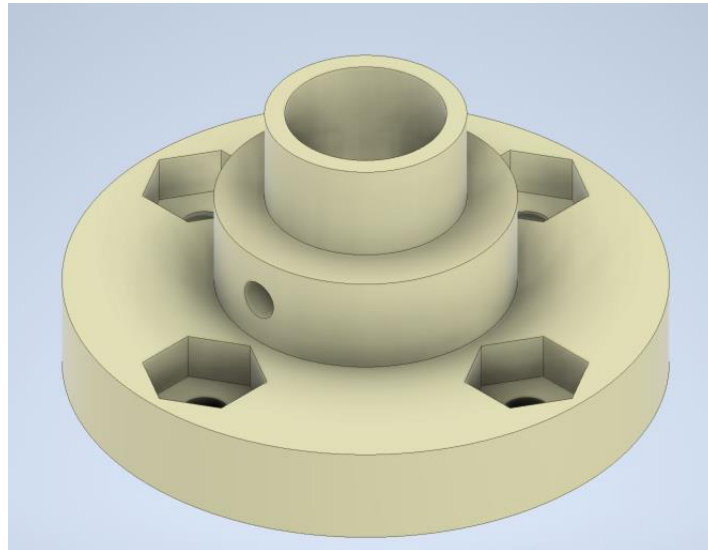


Ilustración 46 Pieza interface hombro tercer diseño

Esta pieza contara con más relleno a la hora de imprimirla en 3D con el finde de asegurar que cumpla con los esfuerzos que pueden surgir en el movimiento del brazo. Cuenta con un agujero para poder colocar un tornillo pasante que la sujete al eje del motor. Ira sujeta al siguiente eslabón mediante el uso de tuercas, las cuales se encajarán en los huecos realizados con las medidas de las misma y gracias a un tornillo que terminara de fijar las piezas.

A continuación, se van a mostrar una seria de imágenes de como se ha rediseñado cada articulación y su análisis. Comenzamos con el hombro.

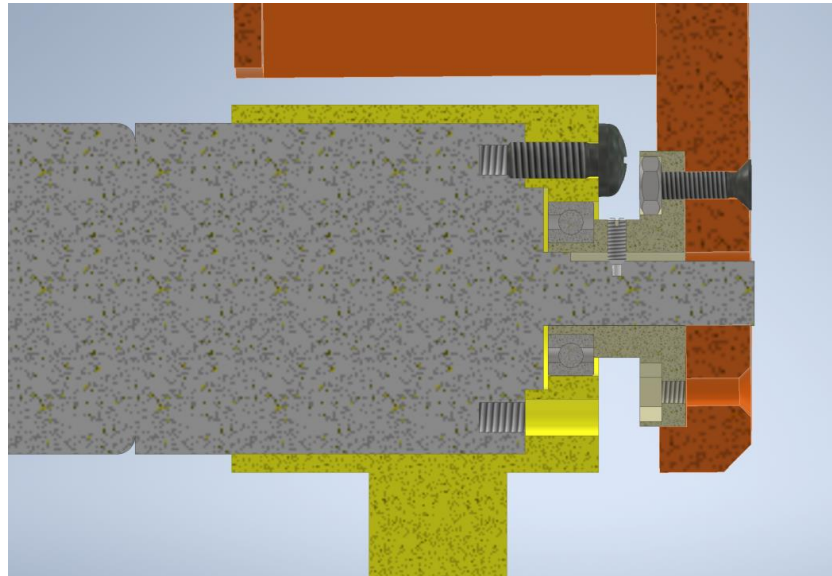


Ilustración 47 Sección de hombro en tercer diseño

El motor (pieza gris), mediante tornillos se fija en su alojamiento (pieza amarilla), el eje queda en el centro, por encima el rodamiento y entre los dos, la interfaz de unión la cual se puede observar con mayor claridad como se sujeta al siguiente eslabón con la tuerca y el tornillo, además, se coloca el tornillo que fija la pieza de interfaz al eje del motor. Para esta articulación no surgen problemas de forma aparente.

La siguiente articulación a analizar es la base.

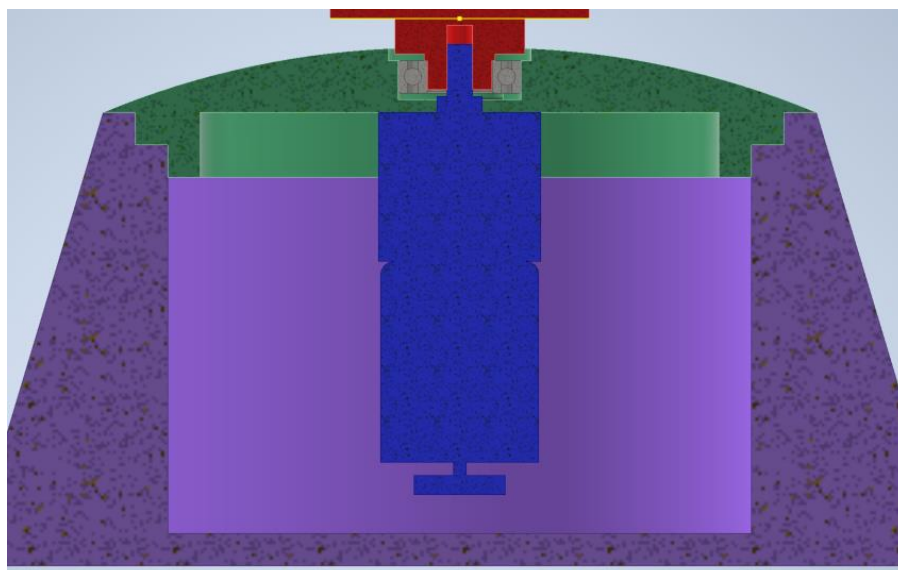


Ilustración 48 Sección base en tercer diseño

Se fija el motor (pieza azul) a la pieza verde mediante el uso de dos tornillos y con un rodamiento se deja caer el peso del motor sobre él, pero la longitud del eje no permite el uso de un tornillo pasante para fijar el eje, además, de que el rodamiento no es el más adecuado para soportar una carga de manera axial.

Continuamos con el codo.

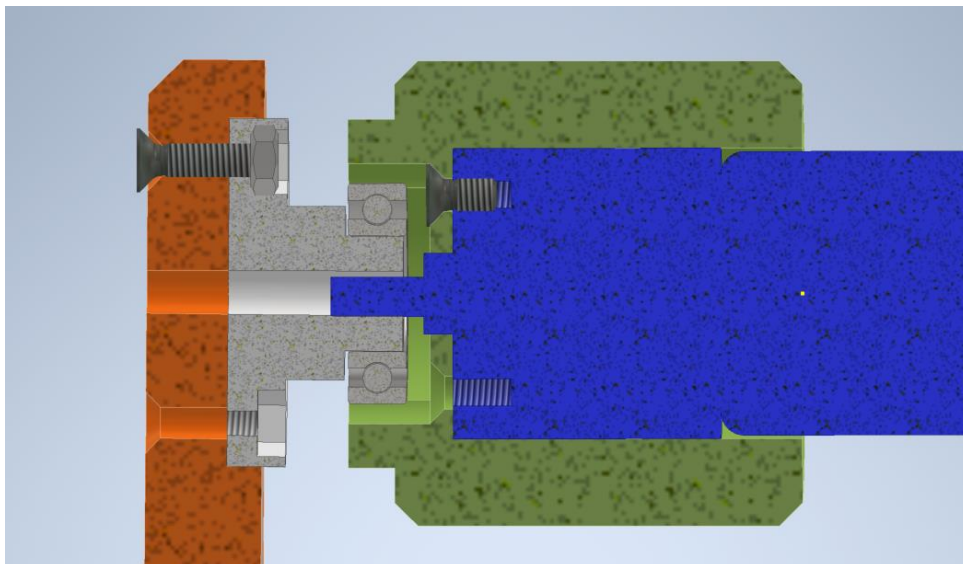


Ilustración 49 Sección codo en tercer diseño

Se fija el motor y se usa una pieza de interfaz similar a la del hombro la cual ira atornillada de la misma manera, mediante tuercas y tornillos. Surge el mismo problema que en la base, la longitud del eje es reducida, por lo que no se puede incorporar el tornillo pasante que fije el eje.

Por último, queda la muñeca.

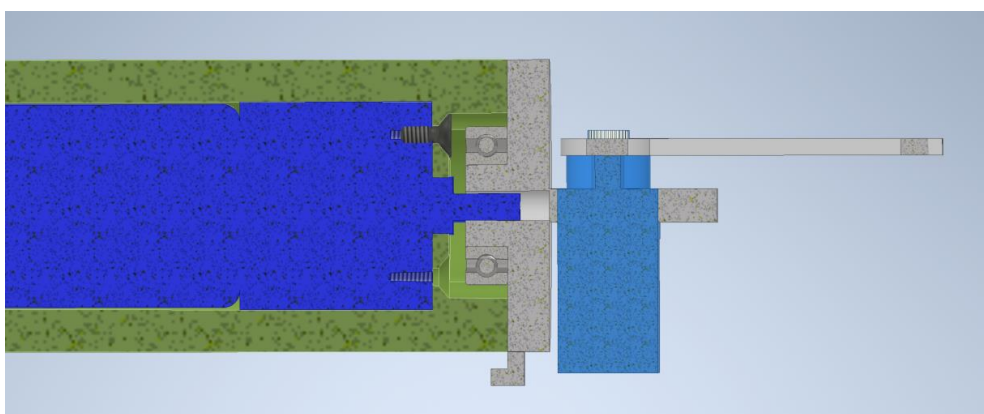


Ilustración 50 Sección muñeca en tercer diseño

El motor queda fijo en su alojamiento y se realiza un hueco para que los tornillos pasen antes que el rodamiento, entre rodamiento y eje se sitúa la pieza principal de la pinza. Al igual que en las otras dos articulaciones no queda espacio para un tornillo de fijación al eje, este limitante viene a raíz de la longitud del eje del motor JGA25-370-103K usado en estas tres articulaciones por lo que se tendrán que volver a rediseñar y buscar una solución para el rodamiento de la base.

2.2.5. Diseño final

En la última fase del diseño se pulen los errores del anterior modelo, entre los que podíamos encontrar la imposibilidad de colocar un tornillo prisionero para los ejes de los motores y la ausencia de los finales de carrera necesarios para la búsqueda de la posición cero de cada articulación. El diseño general ya montado queda así:

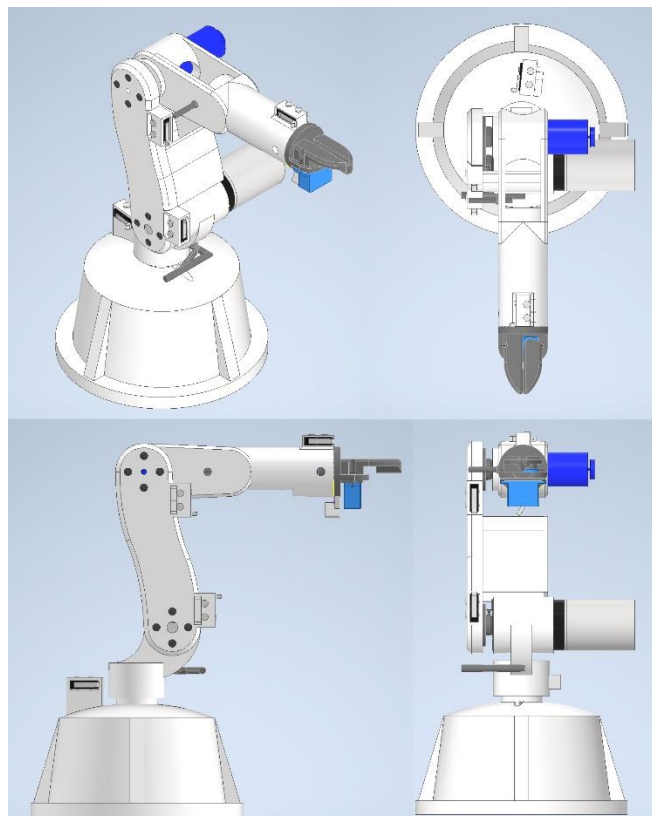


Ilustración 51 Diseño final brazo

2.2.5.1. Modificaciones y soluciones en el diseño

Para solucionar la fijación de los ejes se retranquean los motores de codo y muñeca y se rediseña la base, mientras que el hombro se

mantiene ya que se considera que de esa manera es completamente funcional. Comenzamos con la base.

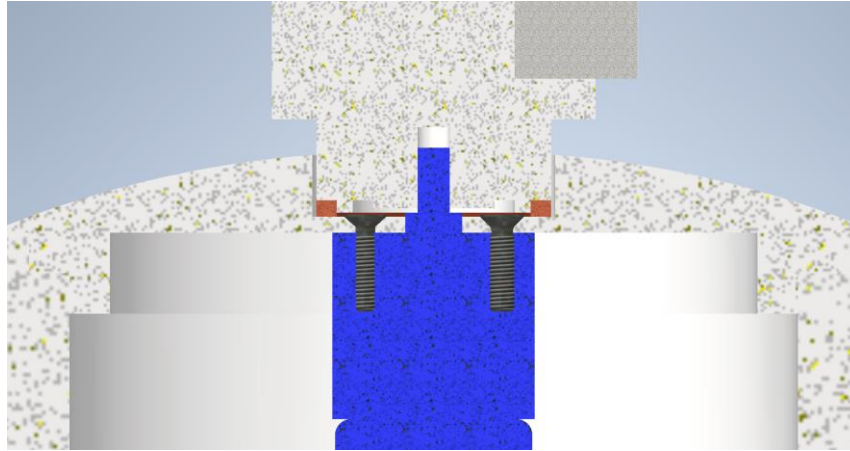


Ilustración 52 Sección base en diseño final

Se decide sustituir el rodamiento, debido a la carga axial que el mismo tendría que soportar, por un extensión de la base del hombro en forma de casquillo cilíndrico fabricado en PLA el cual va ayudado en su parte inferior de un aro de cobre para un mejor deslizamiento, dicho casquillo contara con un agujero mediante el cual se accederá a la colocación del tornillo prisionero del eje del motor de la base, el cual ira sujeto a la base del hombro.

Respecto al hombro, prácticamente no sufre modificaciones a excepción de chaflanes realizados en la pieza que hace de unión o interfaz entre base del hombro y brazo y en los tornillos de sujeción de motor del hombro.

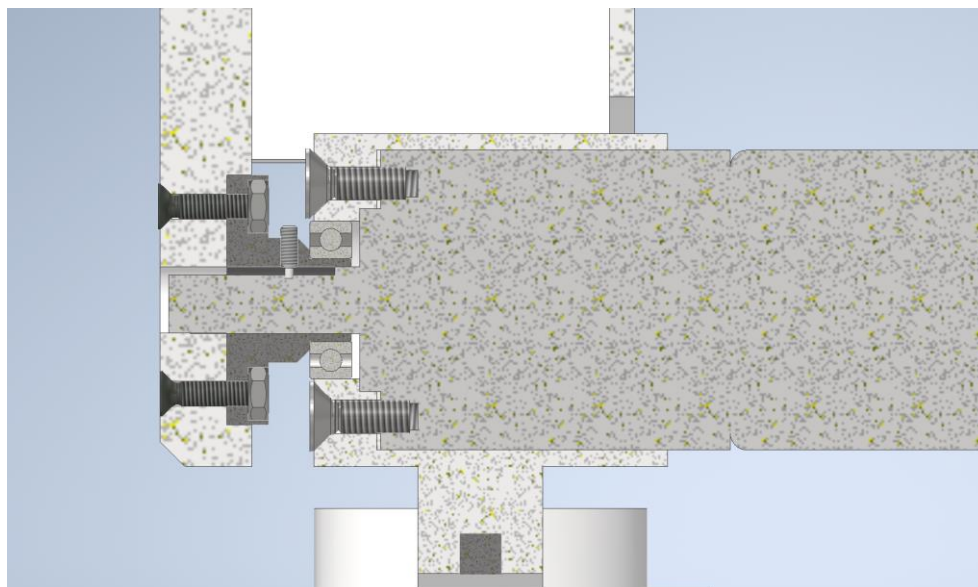


Ilustración 53 Sección hombro en diseño final

La siguiente articulación modificada es el codo.

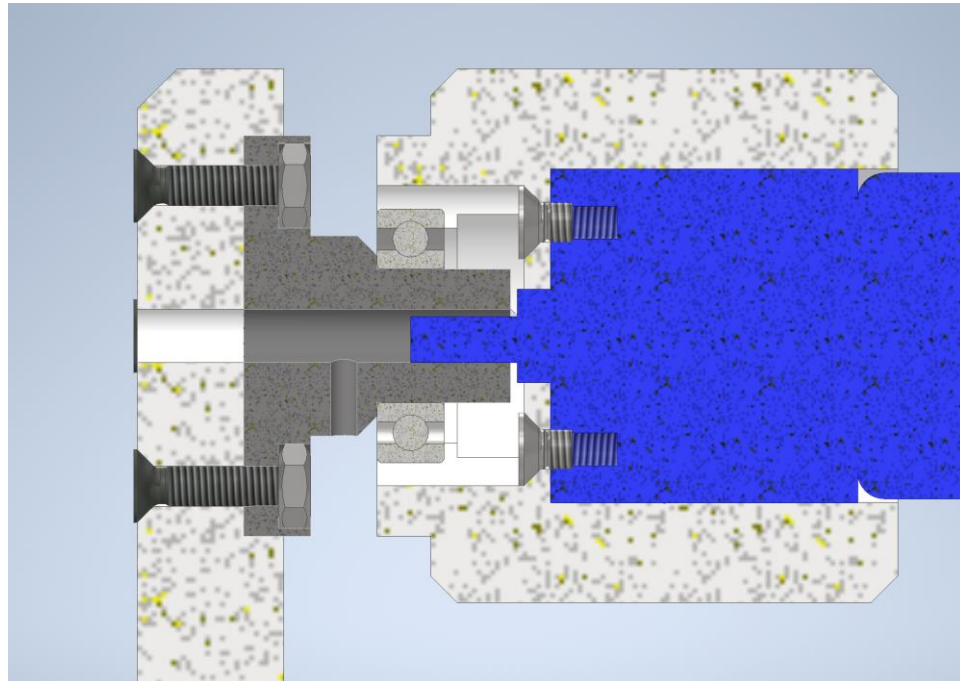


Ilustración 54 Sección codo en diseño final

En este caso se realiza un retranqueo hacia detrás del motor, desplazando el enganche del mismo la distancia suficiente para que el tornillo prisionero del eje del motor tenga espacio, además se dejará un agujero en la carcasa para poder acceder al mismo. Por último, se colocará el rodamiento, el cual se ha dejado en la misma posición.

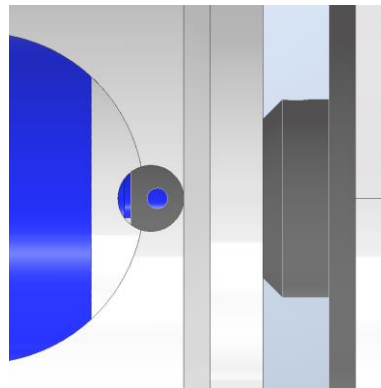


Ilustración 55 Hueco para colocación de tornillo prisionero en codo

La última modificación es en la muñeca.

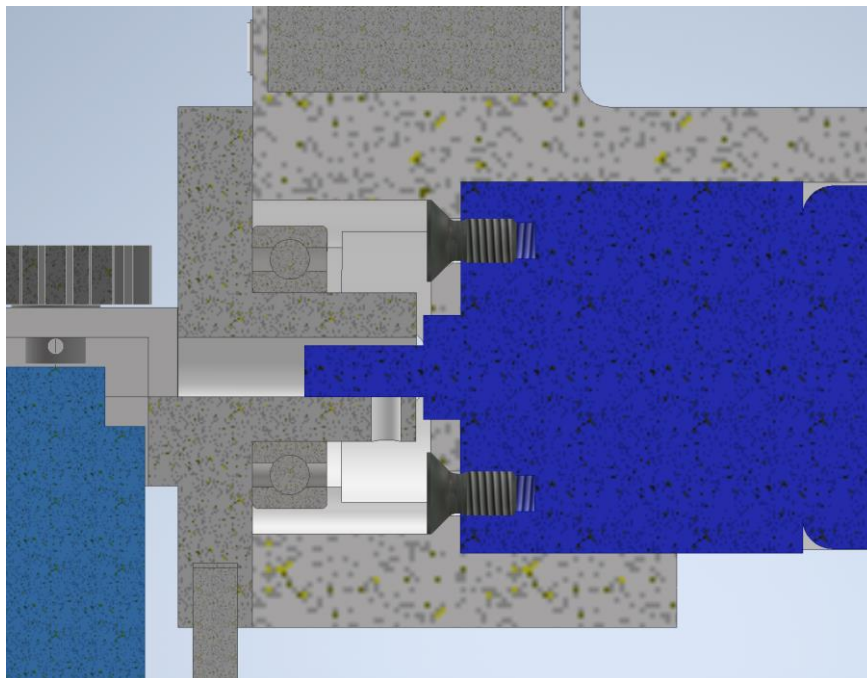


Ilustración 56 Sección de muñeca en diseño final

Se ha realizado el mismo retranqueo que en el caso del codo, moviendo el motor unos milímetros hacia atrás y dejando hueco para el tornillo prisionero, tanto esta modificación como la del codo se realiza por la ausencia de espacio para la colocación de dicho tornillo, ya que la longitud del eje del motor no lo permitía poner después del rodamiento y por tanto la decisión tomada es de localizar este tornillo antes del rodamiento y dejar un agujero en la carcasa para el acceso al mismo.

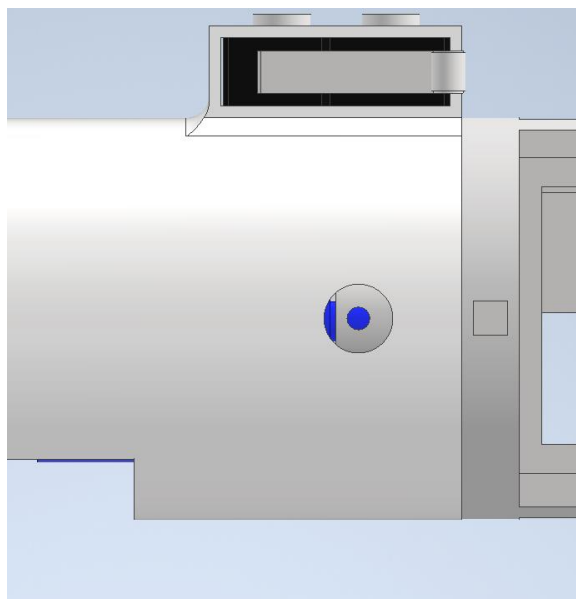


Ilustración 57 Hueco para colocación de tornillo prisionero en muñeca

Por último, queda señalar el diseño final de la herramienta, la cual será en forma de pinza, como se ha especificado anteriormente, esta contara con un pequeño motor de DC el cual ira colocado y unido de forma directa con uno de los lados de la pinza, el otro lado quedara fijo al soporte de la herramienta para así evitar holguras en el mecanismo, esta decisión se tomó debido a un diseño inicial con un engranaje en el que se descubrieron grande holguras y problemas de funcionamiento, por lo que el diseño final sería el siguiente.

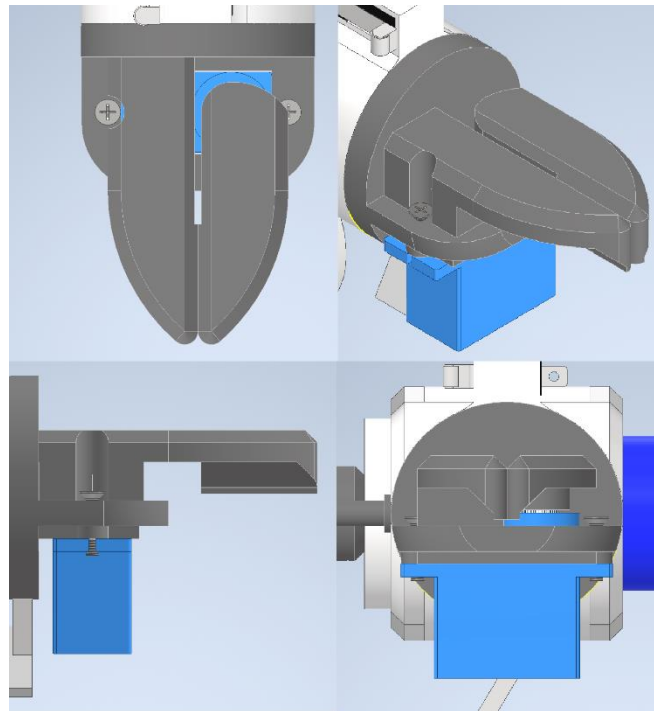


Ilustración 58 Pinza en diseño final

2.2.5.2. Finales de carrera

El siguiente punto es la colocación de los finales de carrera, se sitúan en cada articulación que cuente con un motor de DC, es decir, en base, hombro, codo y muñeca, su principal funcionalidad es la de, cuando el robot se reinicie, buscar la posición de inicio de cada articulación a partir de la cual se podrá situar la posición en la que se encuentra el encoder y poder contar de manera real el ángulo del motor mediante los pulsos del encoder incremental, esto podría ser sustituido por unas baterías que al desconectar de la corriente el robot permita guardar la información de posición, pero al ser un robot de reducidas dimensiones y poder moverse con facilidad con la mano se podría descalibrar con gran facilidad.

El final de carrera elegido es el KW12-3.



Ilustración 59 Final de carrera utilizado (Aliexpress, 2022a)

Este es un interruptor de reducidas dimensiones, tan solo mide 20x11x6 mm, lo que facilita su colocación en determinadas posiciones. Junto a cada final de carrera se tiene que colocar un tope en la carcasa del robot este contara con la posibilidad de ser retirado por si en algún caso limita de alguna manera el movimiento del motor, aunque los límites de cada articulación serán determinados por software. La primera ubicación de los finales de carrera es en la base, este estará colocado con un soporte, el cual lo dejará fijo a la tapa de la base y el tope estará situado en la pieza que hace de unión entre base y hombro.

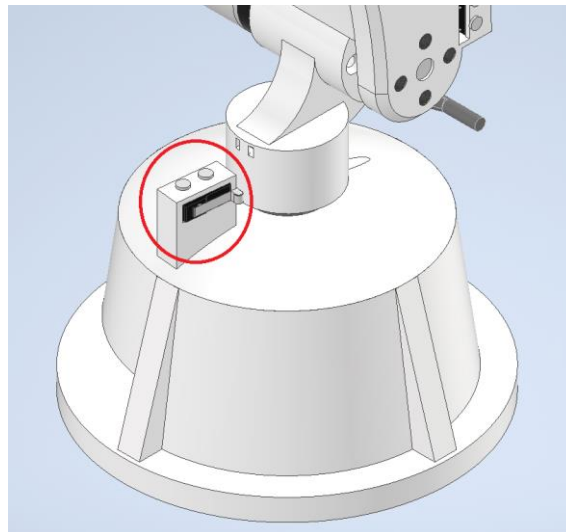


Ilustración 60 Final de carrera señalado en base

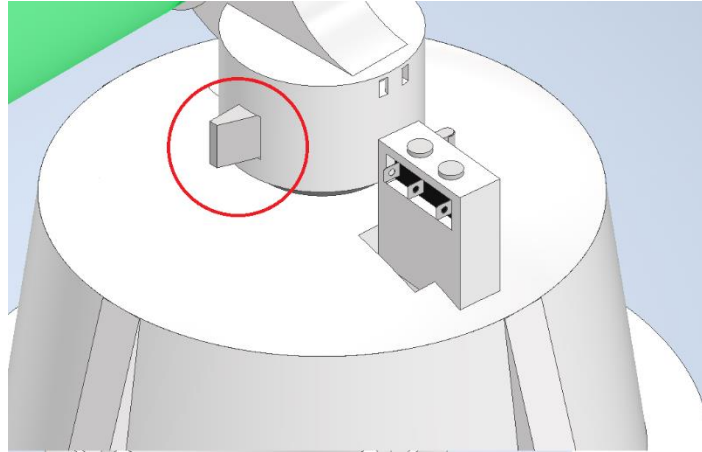


Ilustración 61 Tope de final de carrera señalado en base

El final de carrera para la articulación del hombro está situado en el eslabón del brazo, el cual se moverá para contactar con el tope, situado, al igual que en el anterior caso, en la pieza que hace de unión entre base y hombro.

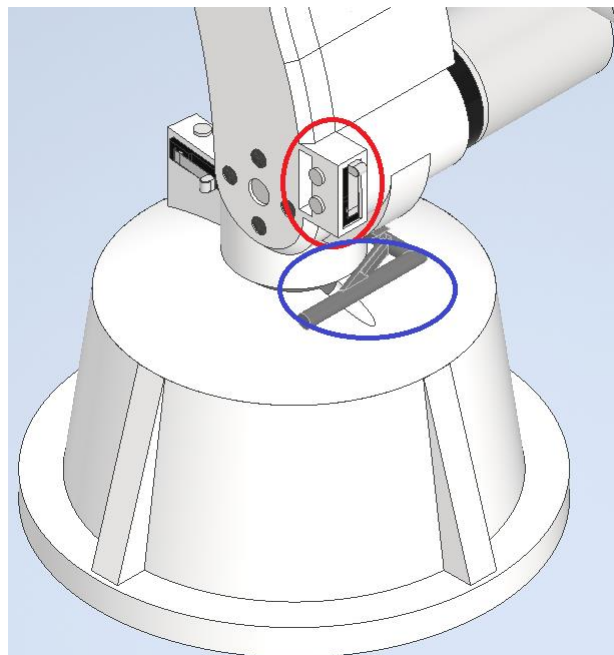


Ilustración 62 Final de carrera señalado en rojo y tope en azul del hombro

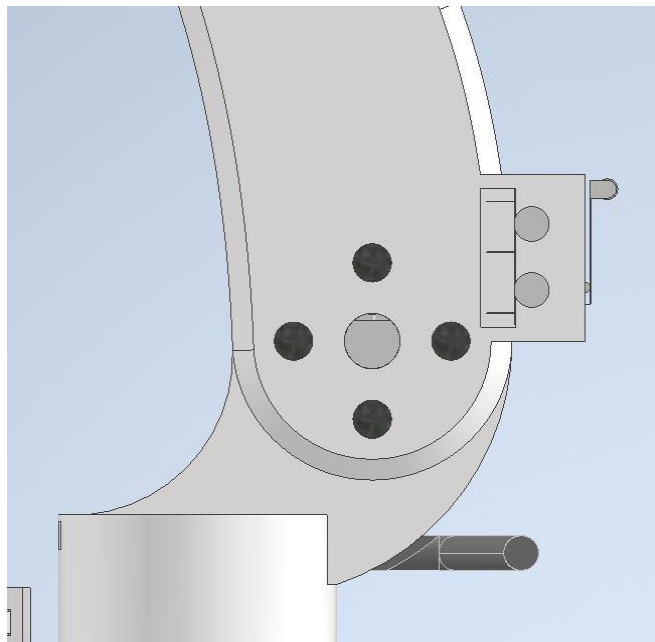


Ilustración 63 Final de carrera y tope en hombro

Para la articulación del codo, el final de carrera se sitúa en el brazo y el tope, que será el que realizará el movimiento, se sitúa en el antebrazo.

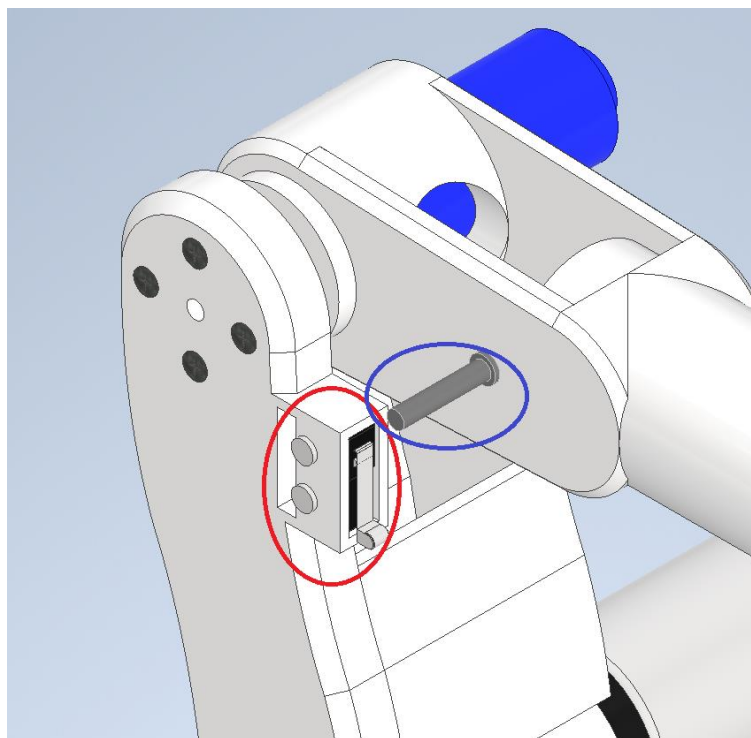


Ilustración 64 Final de carrera señalado en rojo y tope en azul del codo

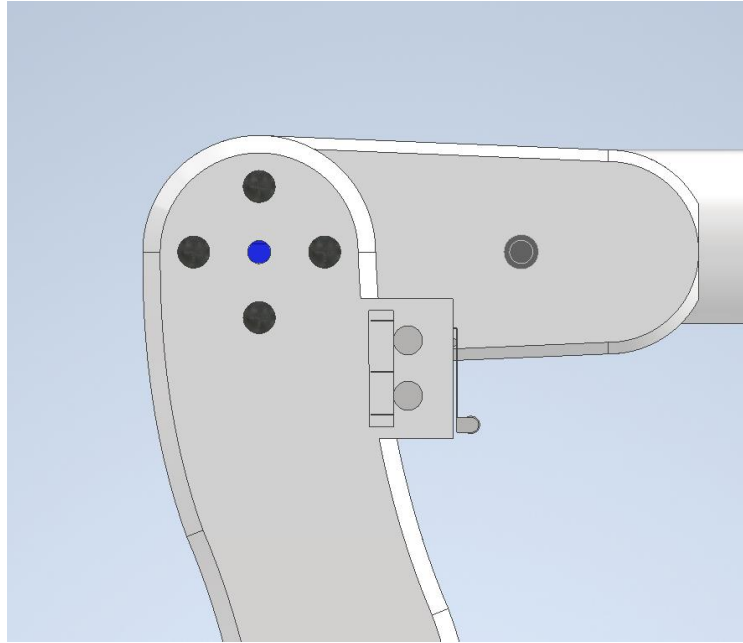


Ilustración 65 Final de carrera y tope en codo

Por último, la muñeca, situando el final de carrera en la parte superior del antebrazo y el tope en la pinza.

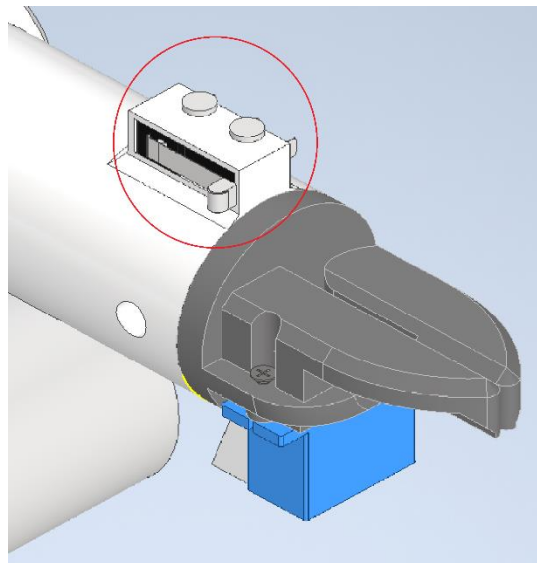


Ilustración 66 Final de carrera señalado en muñeca

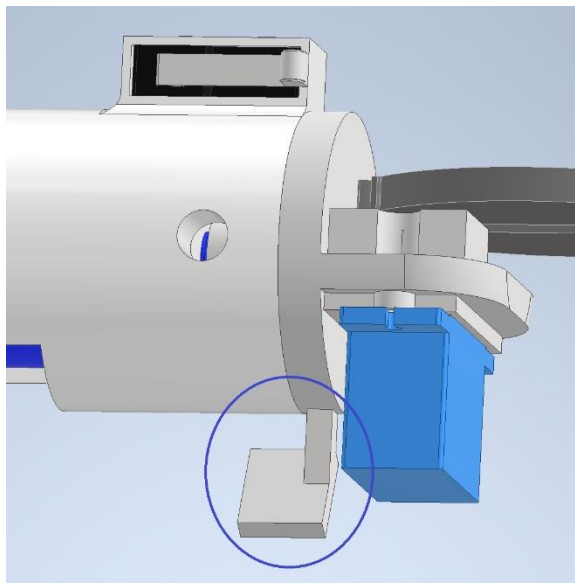


Ilustración 67 Tope final de carrera señalado en muñeca

2.2.5.3. Componentes y montaje

A continuación, se va a mostrar una serie de imágenes donde se podrá apreciar todos los componentes y su forma de montaje.

Comenzamos con la base, el motor está sujeto con 2 tornillos métrica 3 de 4 mm de largo, y el anillo de cobre, que hace función de casquillo, tiene unas dimensiones de 29x24 mm y 2 mm de altura.

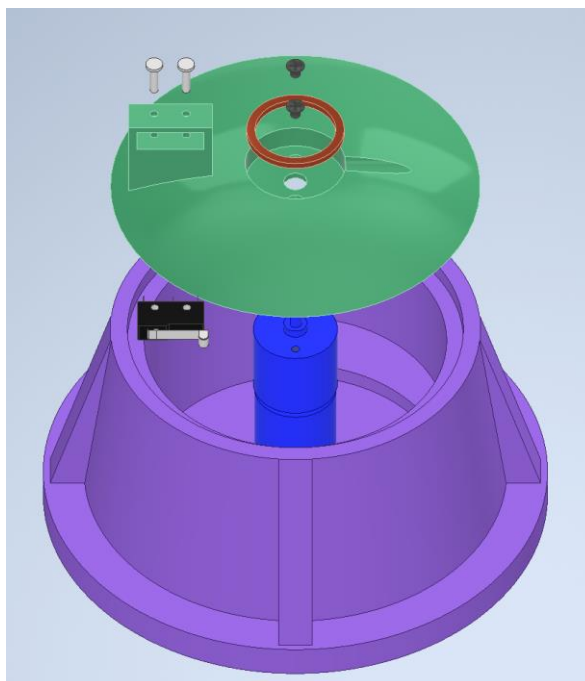


Ilustración 68 Explosionado base

El hombro, en el que el motor se fija mediante 4 tornillos métrica 4 y con una longitud de 12 mm, los rodamientos elegidos cuentan con un diámetro interior de 10 mm, diámetro exterior de 19 mm y anchura de 5 mm.

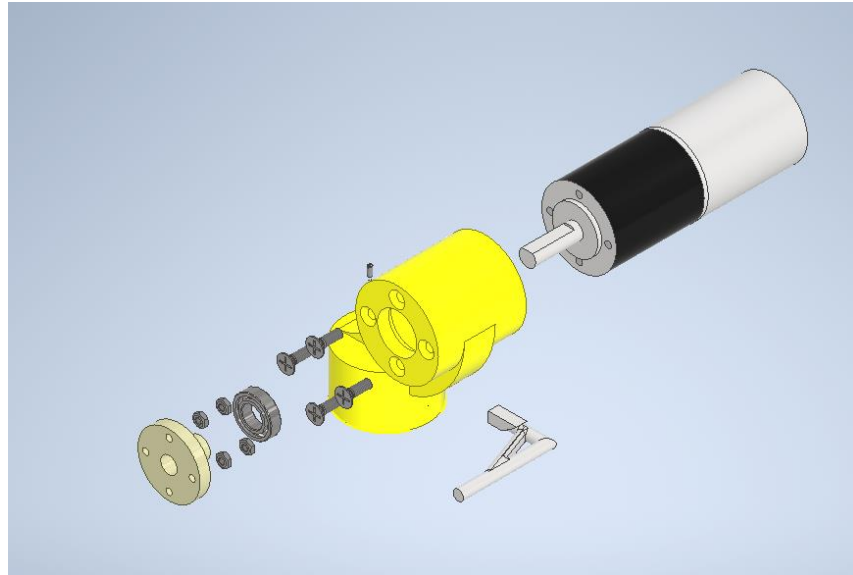


Ilustración 69 Explosionado hombro

En el codo se fija el motor con tornillos M3x4 y con el rodamiento nombrado anteriormente.

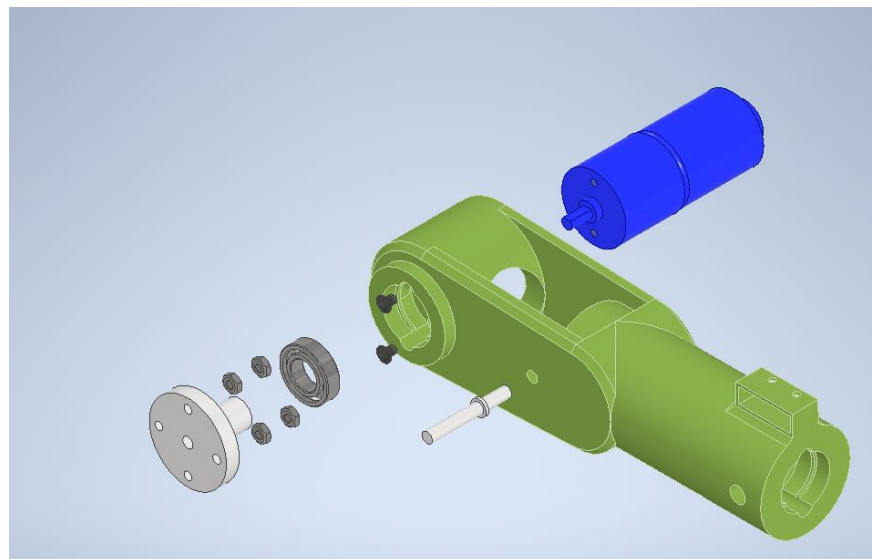


Ilustración 70 Explosionado codo

La muñeca cuenta con el rodamiento y dentro de la estructura, antes de colocar el rodamiento, se colocan los 2 tornillo M3 que fijan el motor, por último, se colocara el tornillo de sujeción del eje mediante el orificio de la carcasa.

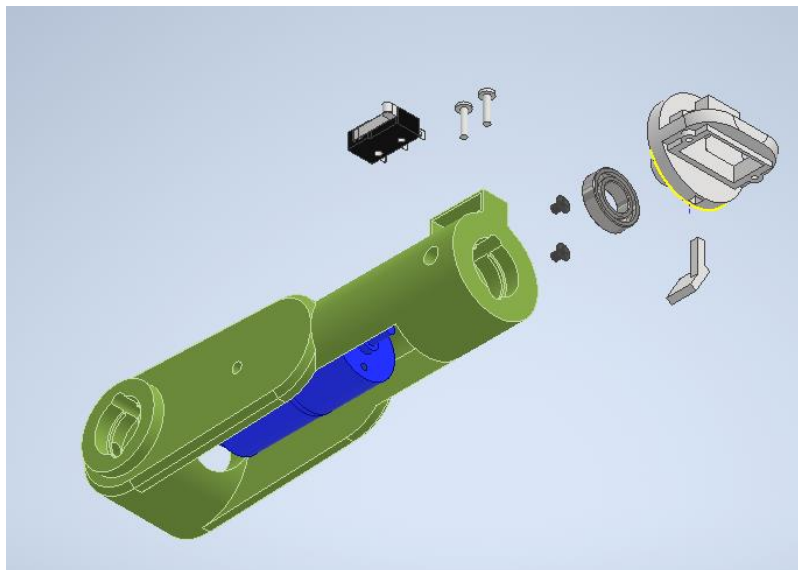


Ilustración 71 Explosionado muñeca

La pinza cuenta con 3 piezas principales y el servomotor, la primera es la base sobre la cual está montada, que está sujeta el motor de la muñeca, luego se coloca el servo, por último las pinzas, una va directamente colocada al eje del motor de DC y la otra ira comunicada con la anterior mediante la rueda dentada que se les incluye.

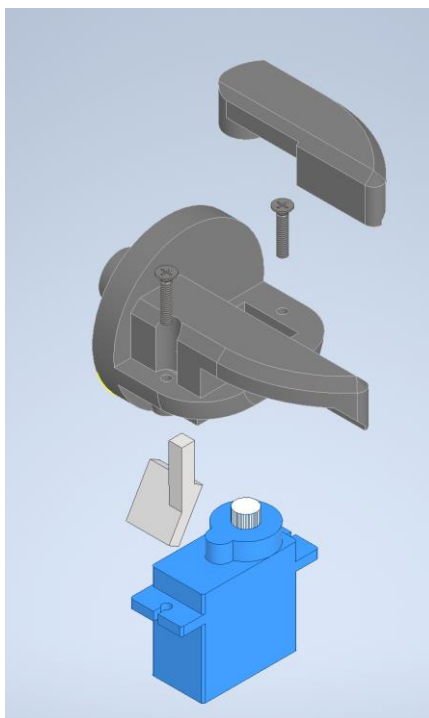


Ilustración 72 Explosionado pinza

Por último, una vez montado base, hombro, codo, muñeca y pinza se procede al montaje final de este conjunto de componentes, para ello utilizaremos la pieza de brazo que hace de unión entre antebrazo y base, además, se colocaran los finales de carrera con sus respectivos topes y los 8 tornillos métrica 3 de 12 mm de longitud.

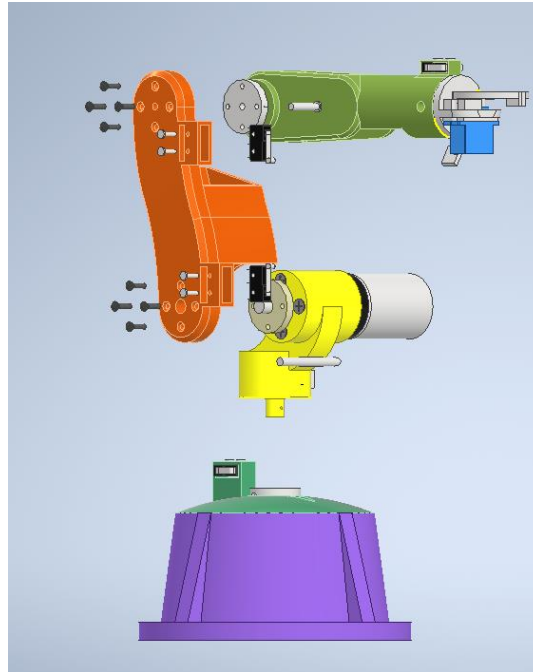


Ilustración 73 Explosionado final

2.3. DISEÑO ELECTRÓNICO

Para la electrónica del robot se va a partir de bloques comerciales, lo cual puede facilitar el montaje, abarata costes y aunque puede quedar con una estética peor de si lo unificáramos todo en una única PCB simplifica en gran medida todo el proceso. Se va a buscar la manera de controlar los motores de la forma más eficaz y de procesar de la mejor manera la señal recibida por de los finales de carrera y los encoder de los motores, además, del manejo de cada articulación del robot. Por último, se buscará una solución para la alimentación del robot.

2.3.1. Componentes utilizados

A continuación, se va a mostrar los componentes elegidos para cada parte de la electrónica del robot en función del objetivo de cada parte o componente.

2.3.1.1. Control de motores

Como se ha explicado en los anteriores apartados se van a utilizar motores de corriente continua, la manera más óptima, más utilizada y sencilla de controlarlos es mediante un puente en H, con el cual se puede

variar tanto su velocidad como su sentido de giro, su funcionamiento interno es muy básico, consta de 4 interruptores, generalmente transistores agrupados de tal manera que contamos con dos entradas de control, además de la alimentación del motor y las salidas que van hacia el motor. La velocidad del motor se puede regular mediante el ancho de pulso de una señal PWM por una de las dos entradas de control y el sentido de giro depende de la entrada por la que introduzcamos dicho PWM. Una vez aclarados con conceptos generales se procede a la elección de puente en H comercial que mejor se adapte a las características de los motores, las cuales son las siguientes:

Para el motor JGA25-370-103K se cuenta con una tensión de alimentación de 12V y un voltaje pico, el cual se dará cuando se requiera el máximo par del motor, de 1.8 amperios.

El motor ABHL 36GP- 555, al igual que el otro modelo requiere de 12V para su alimentación y un amperaje pico de 9.5 amperios, el cual se considerablemente alto, sin embargo, la articulación en la que esta este motor solo requiere de menos de un cuarto de que cuenta el motor por lo que no será necesario un amperaje tan elevado.

El puente en H elegido finalmente es el DRV7781 con el cual se pueden alimentar motores con un voltaje desde 6.5 hasta 45V con un amperaje pico de 3.6 A, más que suficiente para el primer motor y en el caso del segundo, al no llegarse al pico de corriente, también.

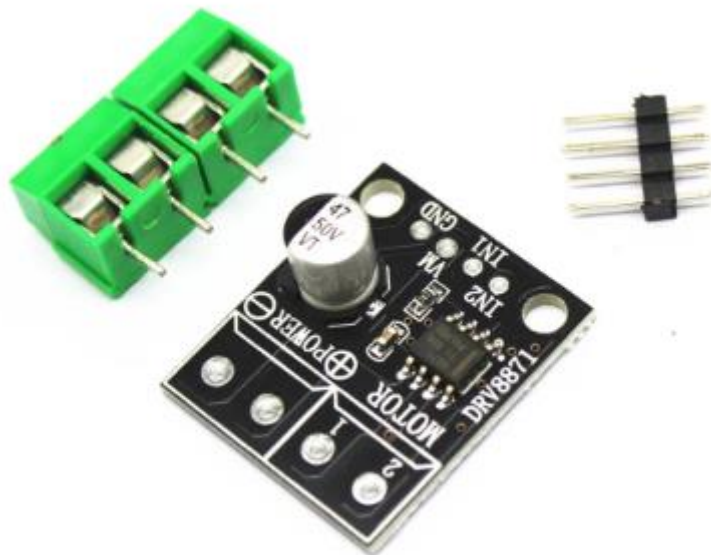


Ilustración 74 DRV 8871(Aliexpress, 2022d)

El modelo escogido viene con la PCB de la que se puede observar la entrada para las 2 señales de control, la entrada de alimentación y la salida al motor. Esta hará de punto intermedio entre motores y alimentación.

2.3.1.2. Control general y manejo del robot

El control central del robot va a estar basado en un microcontrolador mediante el cual se generarán los pulsos PWM para regular sentido y velocidad de los motores y se procesarán las señales recibidas por encoder y finales de carrera, con todas estas señales las procese pudiendo saber la posición de cada articulación y de tal forma saber en qué posición se encuentra el robot.

Se valoran varias opciones como puede ser una placa Arduino Mega con las que se cuenta con pines GPIO suficientes para todas las conexiones nombradas, además de un microcontrolador Atmega 2560 que funciona a 16MHz.

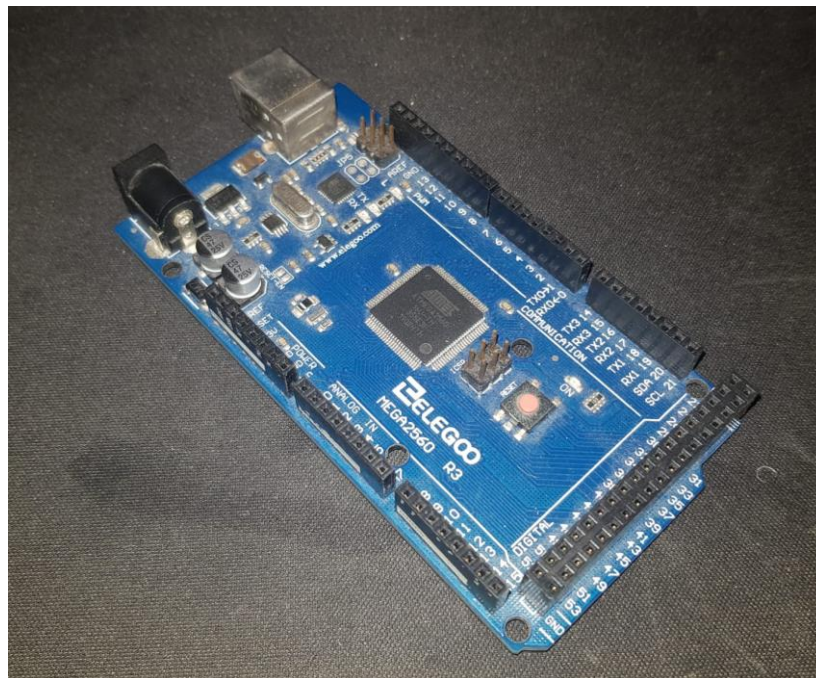


Ilustración 75 Arduino Mega

Mediante el Arduino Mega el robot sería controlado mediante joysticks analógicos, los cuales actúan como potenciómetros y gracias a la entrada analógica, la velocidad o posición de cada grado de libertad podría ser reglado en función al voltaje de entrada. Esta solución se adoptaría para evitar usar módulos extras de Wifi o Bluetooth.

Otra opción es la de usar una placa de desarrollo de ESP-32, dicho chip es un SoC, siglas de System on a Chip el cual funciona a una velocidad de 240Mhz, más de 10 veces la velocidad del Atmega2560. Esta característica nos permite una mejor lectura de los pulsos del encoder, evitándonos posibles errores de posición debidos a una mala lectura del mismo. Por otra parte, cuenta con 25 pines GPIO.



Ilustración 76 Placa ESP32

Por otra parte, cuenta con conexión WIFI y Bluetooth lo que puede facilitar la conectividad de algún dispositivo como un ordenador o teléfono móvil con el robot y de esa manera se realizaría el manejo del robot, ya que dicha placa no cuenta con entradas suficientes para la conexión de joysticks analógicos, por lo tanto el control se tendría que realizar mediante el desarrollo de alguna pequeña aplicación para móvil o mediante una web a través de las cuales nos podríamos conectar al ESP32 y aprovechar por tanto la conectividad que nos ofrece.

2.3.1.3. Alimentación

La alimentación de todo el robot se realizará mediante una fuente la cual ira conectada a la red y que en su salida contara con los 12 voltios para suministrar del voltaje necesario a los motores, cada puente en H que controla los motores está limitado a 3.6 Amperios por lo que en caso de una demanda pico general se requerirán de más de 13 Amperios. La decisión ha sido la de usar una fuente de 240W, es decir, que nos suministre 12V y 20A para tener margen y en algún momento determinado el robot no se quede sin alimentación.



Ilustración 77 Fuente de alimentación(Shopdelta, 2022)

La fuente seleccionada cuenta con una entrada de línea, neutro y tierra para su conexión a la red eléctrica doméstica y dos salidas V+ y V- de las que obtenemos los 12 voltios, a continuación, se va a mostrar cómo se va a cablear y realizar la conexión de la fuente a la red, a los puentes en H y entre motores y control central.

2.3.2. Esquemas eléctricos

En se siguiente esquema se va a mostrar la forma de conexión entre todos los componentes utilizados: puente en H, motores, Control central, finales de carrera y alimentación.

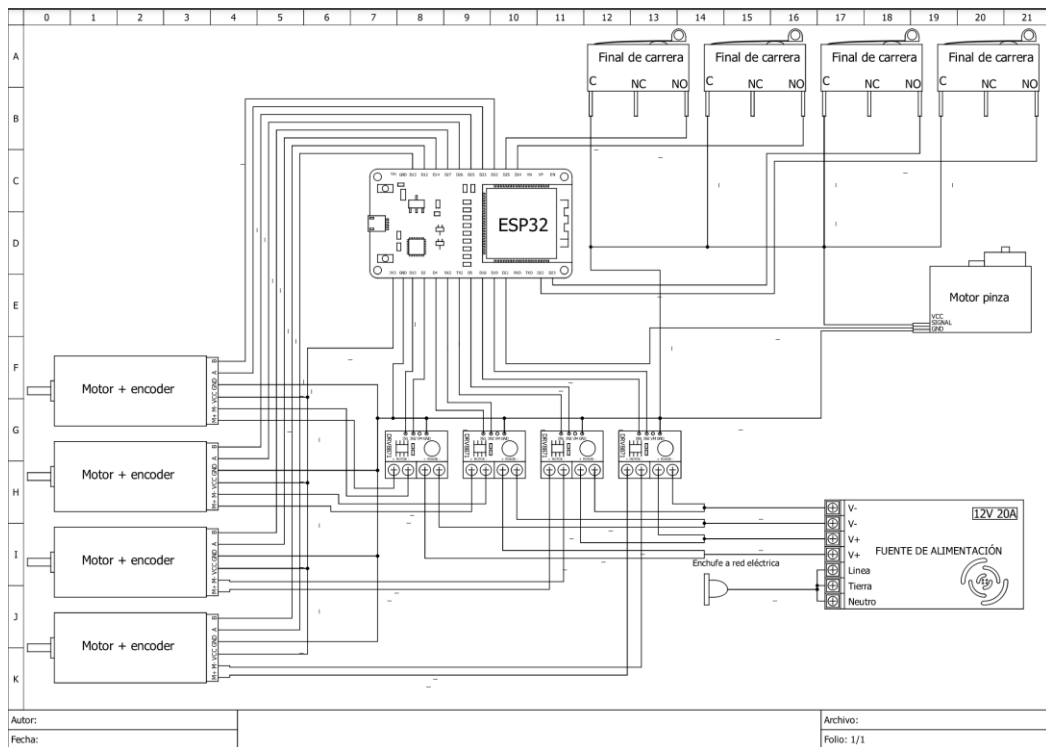


Ilustración 78 Plano de conexionado

Como se puede observar los encoder de los motores están directamente alimentados de la salida de 3.3V de la placa, las salidas A y B son las que nos van a dar los pulsos del encoder y se conectarán también de manera directa.

La alimentación y control de los motores se realiza mediante el puente en H DRV8871, el cual está conectado a la fuente de 12V y a su vez mediante los pines In1 e In2 a la placa del microcontrolador, mediante dichos pines se controlará el voltaje suministrado a los motores con la regulación del ancho de pulso de un PWM.

Por último los finales de carrera se conectarán a 0V en la placa y las salidas de los pulsadores también.

Dicho esquema se puede observar con más detalle en los anexos.

2.4. DESPLIEGUE DE COMPONENTES

Tabla 1 Tabla despliegue componentes

Componente	Precio
Motor 1: JGA25-370-103K (x3)	36.26 €
Motor 2: ABHL 36GP- 555 (x1)	43.26 €
Motor 3: microservo SG90 (x1)	2.41 €
Finales de carrera: KW12-3 (x4)	1.83 €
Driver motores: DRV8871 (x4)	16.95 €
Placa control central: ESP32	10.50 €
Fuente de alimentación: 12V 20A (x1)	21.39 €
Tornillería 1: M3x12 (x8)	1.30 €
Tornillería 2: M4x12 (x4)	1.45 €
Tornillería 3: M3x4 (x6)	1.3 €
Tornillería 4: M2x8 (x3)	1.2 €
Tuercas: ISO4032 M3:1 (x8)	0.96 €
Rodamientos: Din 625 - 10x19x5:1 (x3)	4.18 €
Casquillo cobre: 24x29x1 (x1)	2.72 €

2.5. MONTAJE

En este apartado se va a relatar el proceso de montaje, desde la impresión 3D de las piezas hasta tenerlo ya cableado y montado.

El primer paso es la impresión de todas las piezas diseñadas, para ello se exporta a archivo. STL el cual puede ser leído por un software de impresión 3D, la impresión de todas las piezas tomo más de 30 horas, debido al tamaño, forma y configuración de impresión.



Ilustración 79 Piezas recién impresas

Una vez impresas todas las piezas y recibidos todos los componentes, motores, finales de carrera, tornillería, rodamientos y demás se procede al montaje, se comienza por la base.



Ilustración 80 Piezas base

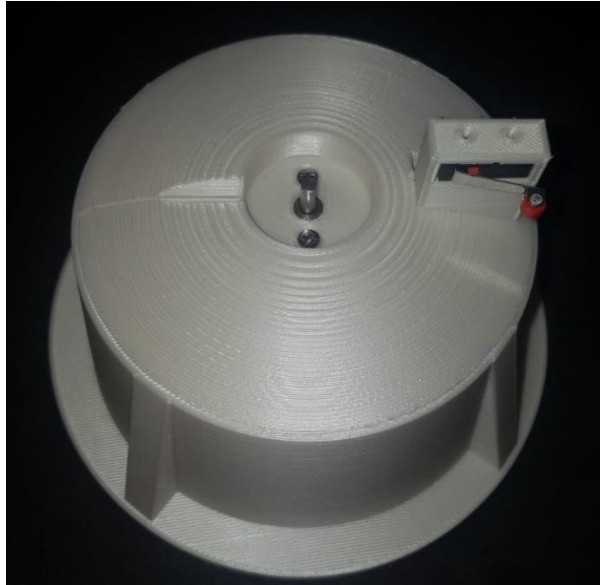


Ilustración 81 Base montada

Se continua por el hombro.



Ilustración 82 Piezas hombro



Ilustración 83 Hombro montado

El siguiente paso es el antebrazo que incluye codo y muñeca.



Ilustración 84 Piezas antebrazo



Ilustración 85 Antebrazo montado

Se continúa uniendo todo por la pieza del brazo.

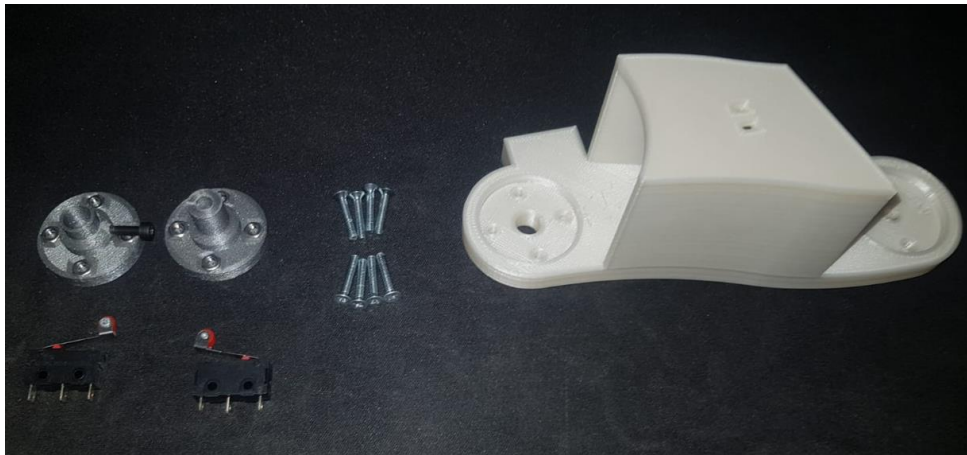


Ilustración 86 Piezas brazo

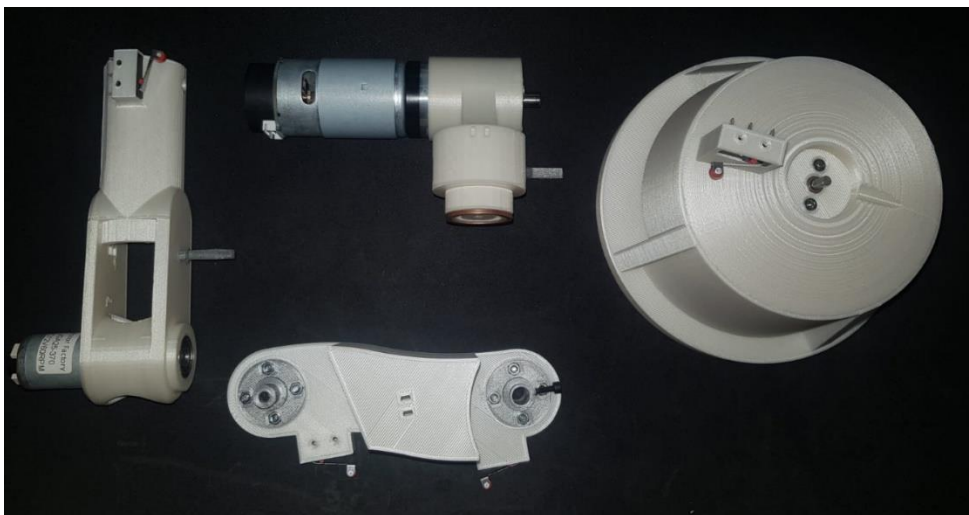


Ilustración 87 Partes finales



Ilustración 88 Montaje final sin pinza

Y por último se añade la pinza.

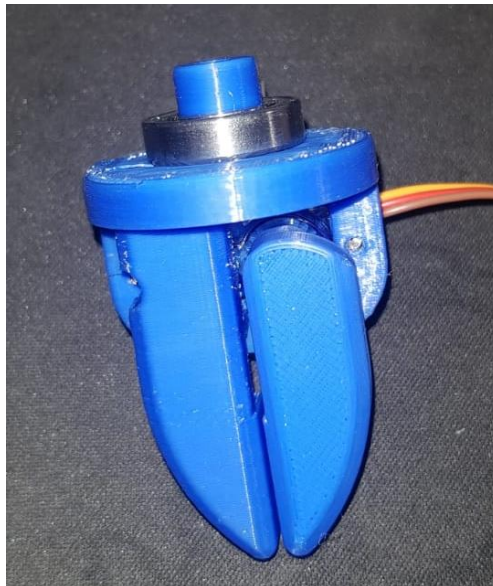
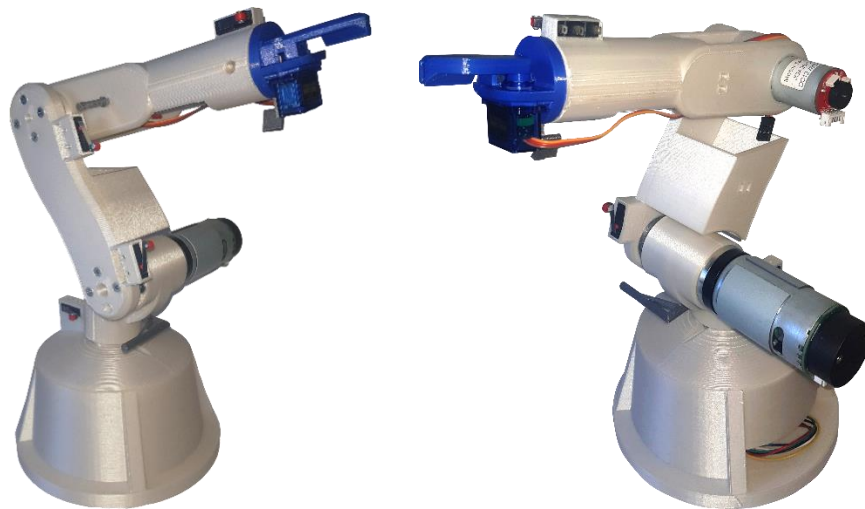


Ilustración 89 Pinza

El resultado final es el siguiente:



Ilustración 90 Montaje final



Una vez montado se procede a cablear el robot de la manera mostrada en el esquema de cableado.

3. CONCLUSIONES

El proceso de desarrollo del brazo robótico ha sido de continua mejora, donde se parte de unas ideas o conceptos y estos se van materializando en forma de diseño hasta que se ha llegado a la última versión del brazo, la más funcional. Respecto a los objetivos, estos se han cumplido en gran medida que partían de un diseño mecánico y electrónico de un brazo robótico.

El diseño mecánico ha sido el que más tiempo, esfuerzo y reflexión han requerido, ya que ha necesitado de varias versiones, las cuales eran o diseños desde cero o mejoras de las anteriores, para llegar a una última versión que, aunque con fallos, es perfectamente funcional. El proceso partía como base en los antecedentes, de los que se puede observar y aprender como empresas expertas en el sector llevan a cabo ese tipo de diseños y las soluciones aplicadas. Respecto a los fallos comentados, estos se van detectan a lo largo de los procesos llevados a cabo, muchos de ellos al inicio, en el diseño, los cuales se corrigen de manera inmediata, pero hay otros que se detectan en el montaje del prototipo, cuando ya es más difícil corregirlos. Algunos de ellos ya han sido solucionados, pero otros con solución pensada, requieren de un rediseño más complejo. Un ejemplo puede ser un pequeño juego que se observa en el codo, esto se debe a la elección de un tornillo prisionero de métrica reducida, lo que produce que el plano del eje del motor tenga ese pequeño movimiento y se comunique a la articulación en general. Con esto pretendo resaltar la importancia de, siempre que sea posible, realizar un prototipo inicial de cualquier diseño o dispositivo, ya que en esta fase es donde se observa el funcionamiento real y la calidad del diseño, detectándose tanto fallos como diseños destacables lo cuales no se detectarían sin esta fase. Entre los objetivos de esta fase se encontraba realizar un diseño y emplear motores de fácil montaje y de reducido precio, el cual se ha cumplido.

La impresión 3D ha sido otro punto que se ha tocado durante el proceso del proyecto, era un campo prácticamente desconocido. He aprendido desde aspectos que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar si se va a imprimir en 3D, hasta de la propia impresión y materiales empleados, los cuales tienen gran importancia en el resultado final o en la fiabilidad del diseño, si de características del material depende. Un ejemplo puede ser la rosca del tornillo prisionero sobre el PLA, si este es de calidad se rosca sin problema y el tornillo se queda fijo, cosa que es de gran dificultad en un PLA de baja calidad.

Por último, en el diseño electrónico se partía de la base del motor elegido en la parte mecánica, el cual llevaba un estudio previo de la gran mayoría de posibilidades con las que se contaba. Una vez el motor estaba elegido se tenía que desarrollar una electrónica de control mediante dispositivos comerciales, como se ha visto, empleando una placa con un microcontrolador como control central y puentes en H como drivers para

los motores y sienta todo esto alimentado por una fuente de alimentación, al cual tenía que contar con suficiente potencia.

Por lo tanto, han sido cumplidos los objetivos de manera general llegado al final con un brazo robótico, el cual puede ser programado de manera sencilla gracias a la placa empleada, cuenta con un diseño que facilita su montaje y unos actuadores que están, junto con los sensores de posición angular, en un mismo dispositivo reduciendo así costes y facilitando el montaje de los mismo.

4. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

En este trabajo de fin de grado se han tratado los siguiente
Objetivos de Desarrollo Sostenible:

4- Educación de calidad.



9- Industria, innovación e infraestructura.



12-Produccion y consumo responsable.



5. BIBLIOGRAFÍA

- Alicia. (2020). *Implementación de servomotores en robótica como tendencia 4.0*. <https://www.calvek.com/implementacion-de-servomotores-en-robotica/#:~:text=Un%20servomotor%20es%20un%20actuador,el%20control%20de%20motores%20industriales>
- Aliexpress. (2022a). *Final de carrera*. https://es.aliexpress.com/item/32966619156.html?spm=a2g0o.order_list.0.0.280b194dz1cr6V&gatewayAdapt=glo2esp
- Aliexpress. (2022b). *Motor DC JGA25*. https://es.aliexpress.com/item/33016407097.html?spm=a2g0o.order_list.0.0.21ef194dRoQjgU&gatewayAdapt=glo2esp
- Aliexpress. (2022c). *Motor DC ABHL 36GP*. https://es.aliexpress.com/item/1005001965823307.html?spm=a2g0o.order_list.0.0.21ef194dRoQjgU&gatewayAdapt=glo2esp
- Aliexpress. (2022d). *DRV 8817*. https://es.aliexpress.com/item/4000336403231.html?spm=a2g0o.order_list.0.0.f562194dPDyEzw&gatewayAdapt=glo2esp
- Amazon. (2022). *Motor brushed*. <https://www.amazon.es/EsportsMJJ-12V-36V-3500-9000Rpm-Grande-Potencia/dp/B075D85KVV>
- areatecnologia. (2022). *SERVOMOTORES*. <https://www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor.html>

- Arroyo Belmonte, M. (2018). *Transmisión por paralelogramo*.
<https://docplayer.es/66893263-Modelado-y-simulacion-dinamica-del-robot-industrial-fanuc-m-410ib-700.html>
- aula21. (2022). *Qué es un Servomotor y para qué sirve*.
<https://www.cursosaula21.com/que-es-un-servomotor/>
- Barrientos, A. (2020a). *Sensores de posición*.
https://www.youtube.com/watch?v=pQClZ2pPzHo&t=1805s&ab_channel=AntonioBarrientos
- Barrientos, A. (2020b). *Transmisiones y Reductores*.
https://www.youtube.com/watch?v=em2PVMk6kdM&ab_channel=AntonioBarrientos
- bricogeek. (2022a). *Motor paso a paso*.
<https://tienda.bricogeek.com/motores-paso-a-paso/422-motor-paso-a-paso-9-kg-cm-mema-23.html>
- bricogeek. (2022b). *Final de carrera*.
<https://tienda.bricogeek.com/interruptores/1267-mini-final-de-carrera-135mm.html>
- Celeramotion. (2022). *Señal de salida encoder incremental*.
<https://www.celeramotion.com/zettlex/es/asistencia/documentacion-tecnica/codificadores-absolutos-y-codificadores-incrementales/>

- Digikey. (2022). *Esquema de control motor brushless*.
<https://www.digikey.com/es/articles/what-is-the-most-effective-way-to-commutate-a-bl-dc-motor>
- Directindustry. (2022). *Transmisión por correa*. Transmisión por correas
- Dobot. (2022). *Dobot magician*. <https://www.dobot.cc/dobot-magician/product-overview.html>
- Encoder. (2022). *¿Qué es un Encoder?* <https://www.encoder.com/article-que-es-un-encoder>
- Euroencoder. (2022a). *Funcionamiento interno encoder incremental*.
<https://euroencoder.com/encoders-incrementales-o-relativos/>
- Euroencoder. (2022b). *Funcionamiento interno encoder magnético*.
<https://euroencoder.com/encoders-magneticos/>
- García, V. (2014). *Puente en H*.
<https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-puente-h-h-bridge>
- Hetpro. (2022). *Motor brushless*. <https://hetpro-store.com/motor-brushless-a2212-13t-1000-kv/>
- Ibaindustrial. (2022). *Funcionamiento interno encoder absoluto*.
<http://www.lbaindustrial.com.mx/que-es-un-encoder-absoluto/>
- Iberobotics. (2022). *Servomotor*.
<https://www.iberobotics.com/producto/micro-servo-towerpro-sg90-1-8kg9g0-12seg/>

Ingemecanica. (2022). *Transmisión por engranaje*.
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html>

Isaac. (2022). *Motor brushless: Lo que deberías saber sobre estos motores*.
https://www.hwlibre.com/motor-brushless/?utm_source=dlvr.it&utm_medium=facebook

Juanpere, R. (2022). *Técnicas de control para motores Brushless*.
https://www.motronic.es/upfiles/taller_img/files/mantenimiento-y-reparacion-de-servomotores-es_2595.pdf

Keyence. (2022). *¿Qué es un sensor de proximidad inductivos?*
<https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/proximity/info/>

López Álvarez, S. (2021). *ESTUDIO Y MEJORA DE ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN EN LOS ROBOTS DE UNA CÉLULA DE ALMACENAJE*.
<https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/175419/Lopez%20-%20Estudio%20y%20mejora%20de%20elementos%20de%20transmision%20en%20los%20robots%20de%20una%20celula%20de%20almacenaje.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Lynxmotion. (2018). *Lynxmotion AL5D PLTW*.
<https://www.robotshop.com/es/es/lynxmotion-al5d-pltw-kit-brazo-robotico.html#product-reviews>

Lynxmotion. (2022). *Lynxmotion AL5D PLTW.*

<https://www.robotshop.com/es/es/lynxmotion-al5d-pltw-kit-brazo-robotico.html#product-reviews>

Maker. (2022). *Anchos de pulso control servo.*

<https://www.makelectronico.com/tutorial-servomotor-0-180-arduino/>

Makelectronico. (2022). *Potenciometro.*

<https://www.makelectronico.com/producto/potenciometro-encoder-de-rotacion-digital/>

McGrady, C. (2016). *Construcción y operación de un motor de CC con escobillas.*

<https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/which-dc-motor-is-best-for-your-application>

Mecafenix. (2017). *Sensor de proximidad capacitivo.*

<https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensor-proximidad-capacitivo/>

Mecafenix. (2022). *Sensor RVDT.*

<https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/rvdt/>

Novelec. (2022). *Finales de carrera: Qué son y características principales.*

<https://blog.gruponovelec.com/electricidad/finales-de-carrera-que-son-y-caracteristicas-principales/>

- Platea. (2016). *Estructura de un robot industrial*.
http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/sistema/morfologia.htm
- Punto Flotante. (2022). *Principios de funcionamiento del encoder cuadratura de efecto Hall*.
<https://www.puntofotante.net/FUNCIONAMIENTO-ENCODER-CUADRATURA-EFECTO-HALL.htm#:~:text=Los%20conocidos%20como%20'encoders%20cuadratura,del%20c%C3%ADrculo%20de%20360%C2%B0>
- RS. (2022). *Encoder*. <https://es.rs-online.com/web/p/sensores-de-control-de-movimiento/8226392>
- Santiago. (2020). *Elementos Constitutivos de un Robot Industrial*.
<http://www.udesantiagoovirtual.cl/moodle2/mod/book/tool/print/index.php?id=24908>
- Secoin. (2022). *Sensor capacitivo e inductivo*.
<https://www.secoin.com.uy/productos/componentes-de-automatizaci%C3%B3n/sensores-inductivos-y-capacitivos/sensores-de-proximidad-inductivos-y-capacitivos>
- Sensing. (2022). *Sensores de ángulo inductivos RVDT*. <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-angulo-y-rotacion/sensores-de-angulo-inductivos-rvdt/>
- Servo Motor Adjust. (2022). *¿Cuál es la diferencia entre un encoder incremental y absoluto?*

<https://www.servomotorsadjust.com/cual-es-la-diferencia-entre-un-encoder-incremental-y-absoluto/>

Shopdelta. (2022). *Fuente de alimentación.*

https://shopdelta.eu/switching-adapter-12v20ap_l2_p4888.html?set_currency_id=26

Solchaga, G. (2015). *Pulsos fases motor brushless.* https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/19222/TFG_Gonzalo%20Solchaga.pdf;jsessionid=9A456B016C745E393E663D7E4C95942F?sequence=1

tdrobotica. (2022). *Servomotor.*

<https://tienda.tdrobotica.co/categoria/522-servo-giro-limitado-hd-6001mg-70-kg-cm.html>

Techlook. (2022). *Motor paso a paso junto a controlador ULN2003.*

<https://www.techlookelectronica.com/producto/motor-paso-a-paso-28byj-48-5v-modulo-de-control-uln2003/>

TME. (2020). *MOTOR PASO A PASO – TIPOS Y EJEMPLOS DEL USO DE*

MOTORES PASO A PASO. <https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/41861/Motor-paso-a-paso-tipos-y-ejemplos-del-uso-de-motores-paso-a->

[paso/#:~:text=El%20motor%20paso%20a%20paso,eje%20cada%201%2C8%20%B0](https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/41861/Motor-paso-a-paso-tipos-y-ejemplos-del-uso-de-motores-paso-a-paso/#:~:text=El%20motor%20paso%20a%20paso,eje%20cada%201%2C8%20%B0)

WLkata. (2022). *WLkata mirobot.* <https://www.wlkata.com/WLKATA>



Relación de documentos

(X) Memoria	79	páginas
(_) Anexos	23	páginas
Planos	20	páginas

La Almunia, a 20 de septiembre de 2022

Firmado: Álvaro García Ávila