

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño de gripper para robot serial R17 controlado de manera
inalámbrica**

Trabajo de graduación presentado por Rony Alejandro Schumann
Duarte para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecatrónica

Guatemala,

2022

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



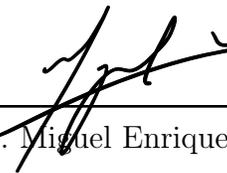
**Diseño de gripper para robot serial R17 controlado de manera
inalámbrica**

Trabajo de graduación presentado por Rony Alejandro Schumann
Duarte para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecatrónica

Guatemala,

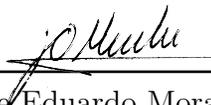
2022

Vo.Bo.:

(f) 
MSc. Miguel Enrique Zea Arenales

Tribunal Examinador:

(f) 
MSc. Miguel Enrique Zea Arenales

(f) 
MSc. Jose Eduardo Morales Espinoza

(f) 
Ing. Diego Alberto Morales Ibañez

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de enero de 2022.

Quiero agradecerle a Dios por darme la oportunidad de estudiar. A mis padres Sara y Rony por ser mi ejemplo a seguir y los pilares de mi vida. A mis abuelitos Rosita, Rony, Ana y Félix por demostrarme lo lejos que se puede llegar con esfuerzo y dedicación. A todos mis tíos y tías, en especial Laura por ser como mi segunda madre. A mis hermanos Sara y Jose, a todos mis primos, a mi novia Sandra por su comprensión y por permanecer a mi lado en todo momento. Asimismo, le agradezco a mis amigos y compañeros de la u por todos los momentos felices.

En general le agradezco a toda mi familia y amigos por su apoyo y cariño a lo largo de mi vida. De igual manera le agradezco a mis mascotas por acompañarme todas las noches de desvelo a lo largo de mis estudios.

Por último, le agradezco a la universidad, catedráticos y al departamento por su apoyo. En especial a Dominik, Estuardo, Willy y a mi asesor Miguel Zea por ayudarme durante todo el trabajo de graduación. En esencia gracias a todas las personas que de algún modo contribuyeron a mi formación personal y académica.

Prefacio	v
Lista de figuras	x
Lista de cuadros	xi
Resumen	xiii
Abstract	xv
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. BLT Gripper: An Adaptive Gripper With Active Transition Capability Between Precise Pinch and Compliant Grasp	3
2.2. Optimal design of a soft robotic gripper for grasping unknown objects	4
2.3. Megaproyecto GC-R17: Sistema háptico de control a distancia	5
2.4. Diseño e implementación de una red de comunicación WiFi e interfaz gráfica para una mesa de pruebas de robótica de enjambre	5
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Alcance	11
6. Marco teórico	13
6.1. Efectores finales	13
6.1.1. Efectores finales de manipulación	13
6.1.2. Efectores finales de herramienta	15
6.2. Mecanismos para grippers	16
6.2.1. Grippers de movimiento paralelo	16

6.2.2. Grippers de movimiento angular	17
6.2.3. Grippers de movimiento radial	19
6.3. Análisis de posición de mecanismos	19
6.4. Control de fuerza	20
6.5. Robot R17	21
6.5.1. Comunicación del robot R17	23
6.6. Motor Dynamixel AX-12A	23
6.6.1. Dynamixel Protocol 1.0	28
6.7. Microcontrolador ESP32	29
6.8. Captura de movimiento	30
7. Metodología	33
7.1. Diseño mecánico	33
7.2. Diseño electrónico	34
7.3. Desarrollo de firmware	34
7.4. Control de fuerza	34
7.5. Integración al ecosistema del Robotat	35
8. Diseño y manufactura	37
8.1. Diseño mecánico	37
8.1.1. Mecanismo	37
8.1.2. Diseño 3D	40
8.1.3. Desempeño mecánico del gripper	41
8.2. Diseño electrónico	43
8.2.1. Circuito electrónico	43
8.2.2. PCB	49
9. Firmware	51
9.1. Rutinas de movimiento del gripper	51
9.2. Control de fuerza	52
9.3. Comunicación inalámbrica	54
10. Conclusiones	59
11. Recomendaciones	61
12. Bibliografía	63
13. Anexos	65
14. Glosario	67

Lista de figuras

1. Gripper BLT [1].	4
2. Diseño final del soft gripper [2].	4
3. Efector final utilizado en el megaproyecto [3].	5
4. Tipos de agarre [7].	14
5. Generación de agarre [7].	14
6. Ejemplo de grippers penetrantes.	15
7. Ejemplo de efectores finales de herramienta.	15
8. Mecanismos típicos para grippers [6].	16
9. Mecanismos típicos de movimiento paralelo a partir de movimiento lineal [6].	17
10. Mecanismos de movimiento lineal con traslación circular [6].	17
11. Otros mecanismos de movimiento lineal con traslación circular [6].	17
12. Mecanismos de grippers con movimiento angular [6].	18
13. Mecanismos de grippers con movimiento angular [6].	18
14. Mecanismos de movimiento radial [6].	19
15. Lazo vectorial de posición de un mecanismo de 4 barras [11].	20
16. Diagrama de bloques retroalimentación negativa (basado en [12]).	21
17. Robot R17.	21
18. Ejes de robot R17.	21
19. Adaptador de gripper del robot R17 [13].	22
20. Dimensiones del servomotor AX12-A [15].	25
21. Pinout del board ESP32 [17].	30
22. Mecanismo de cada dedo.	38
23. Coordenadas teóricas del punto B del mecanismo en función del ángulo de entrada θ_2	39
24. Trayectoria teórica del punto B del mecanismo.	39
25. Ángulo del eslabón b en función del ángulo de entrada θ_2	39
26. Piezas que componen el mecanismo de sujeción.	40
27. Ensamble de la pinza.	41
28. Gripper ensamblado con las piezas impresas en 3D.	41
29. Comparación de trayectoria experimental y teórica del punto B.	41

30. Comparación de coordenadas teóricas y experimentales del punto B en función de θ_2 .	42
31. Diagrama de caja y bigote de la diferencia entre coordenadas teóricas y experimentales.	42
32. Diagrama de caja y bigote de la diferencia entre ángulo θ_3 teórico y experimental.	42
33. Gripper sujetando objetos de diferentes geometrías.	43
34. Esquemático de fuente de alimentación.	45
35. Esquemático del ESP32.	46
36. Esquemático del multiplexor.	46
37. Esquemático del conversor de nivel bidireccional.	47
38. Esquemático de pines de entradas y salidas.	47
39. Salida $Data_L$ con señal de entrada en nodo $Data_H$.	48
40. Salida $Data_H$ con señal de entrada en nodo $Data_L$.	48
41. Salida de los 2 canales del multiplexor con $enable = 0$.	49
42. Salida de los 2 canales del multiplexor con $enable = 1$.	49
43. Diseño preliminar de PCB.	50
44. PCB de gripper con componentes provisionales.	50
45. Control implementado en el gripper.	52
46. Diagrama de bloques control proporcional convencional.	53
47. Gripper aplicando diferente fuerza sobre el mismo objeto.	53
48. Porcentaje de paquetes recibidos en función del delay entre instrucciones de envío.	55
49. Porcentaje de paquetes recibidos en función de la distancia entre dispositivos ESP32.	55
50. Captura de pantalla de toma de datos en Tracker.	65
51. Acople del gripper al R17.	66

Lista de cuadros

1.	Características del robot R17 [13].	22
2.	Porcentaje de error de los baud rates del servomotor AX-12A [15].	24
3.	Características del servomotor AX-12A [15].	24
4.	Características del pinout del servomotor AX-12A [15].	25
5.	Tabla de memoria EEPROM del servomotor AX12-A [15].	26
6.	Tabla de memoria RAM del servomotor AX12-A [15].	27
7.	Tabla de instrucciones del protocolo Dynamixel 1.0 [16].	28
8.	Tabla de descripción del byte de error del protocolo Dynamixel 1.0 [16].	29
9.	Trade study de cantidad de dedos del gripper (notas sobre 5).	38
10.	Trade study sobre fuente de potencia (notas sobre 5).	44
11.	Trade study sobre tipo de regulador de voltaje (notas sobre 5).	45
12.	Funciones de la librería para el control de los motores Dynamixel AX12-A.	51
13.	Cuadro de error estacionario con diferente fuerza referencia.	54
14.	Trade study sobre tipo de comunicación a implementar.	55
15.	Funciones de la librería para la comunicación bluetooth.	56

En el presente trabajo se describe el diseño y manufactura de un gripper altamente habilidoso para el robot R17. EL cual es capaz de comunicarse de manera inalámbrica dentro del nuevo ecosistema del laboratorio de robótica de la universidad, volviéndose una extensión del brazo robótico R17. Para esto se utilizaron los servomotores Dynamixel Ax12-A y el microcontrolador ESP32. El desarrollo de este proyecto incluye el diseño mecanismo del gripper, la impresión 3D de sus componentes o piezas que lo conforman, el diseño del circuito electrónico capaz de manejar distintos voltajes de operación y el desarrollo del firmware para establecer una rutina de control del gripper.

Asimismo se probó su funcionalidad en donde el mecanismo y circuito electrónico presentaron un comportamiento satisfactorio, así como todos los protocolos de comunicación que implementa. Por otra parte se probó la capacidad del gripper para sujetar distintos objetos en donde se determinó que el gripper es capaz de sujetar objetos de distintas geometrías y de dimensiones cuyo ancho es mayor a 3.5cm y menor a 6.5cm o cuyo diámetro es mayor a 4cm y menor a 6.5cm.

This work describes the design and manufacture of a highly skilled gripper for the R17 robot. EL which is able to communicate wirelessly within the new ecosystem of the university's robotics laboratory, becoming an extension of the R17 robotic arm. For this, the Dynamixel Ax12-A servo motors and the ESP32 microcontroller were used. The development of this project includes the design of the gripper mechanism, the 3D printing of its components or parts that comprise it, the design of the electronic circuit capable of handling different operating voltages and the development of the firmware to establish a gripper control routine.

Likewise, its functionality was tested where the mechanism and electronic circuit showed satisfactory behavior, as well as all the communication protocols that it implements. On the other hand, the ability of the gripper to hold different objects was tested, where it was determined that the gripper is capable of holding objects of different geometries and dimensions whose width is greater than 3.5cm and less than 6.5cm or whose diameter is greater than 4cm and less than 6.5cm.

En la Universidad del Valle de Guatemala se posee un brazo robótico R17 de la compañía ST Robotics, el cual pertenece al departamento de Ingeniería Electrónica, Mecatrónica y Biomédica. Este robot serial ha sido utilizado en varios proyectos desde su llegada a la universidad. Sin embargo, en ningún proyecto se ha empleado para llevar a cabo algún tipo de manipulación robótica a pesar de que este sea el propósito general de los robots de este tipo. Esto, en gran parte, se debe a que el gripper original del robot R17 dejó de funcionar, sin mencionar que dicho gripper utiliza tecnología neumática la cual es bastante anticuada para ser implementada en este campo.

Por otra parte, en las nuevas instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala se está creando un ecosistema moderno en el laboratorio de robótica el cual está inspirado en ecosistemas existentes encontrados en universidades de primer mundo. Este ecosistema consiste en integrar diferentes agentes (robots) para que puedan interactuar entre sí por medio de un protocolo de comunicación inalámbrica WiFi. A dicho ecosistema se le estará refiriendo como ecosistema Robotat en el resto del documento.

Dicho esto, el nuevo gripper diseñado para el R17 actuará como una extensión del robot R17 el cual será agente extra dentro del laboratorio por lo que es necesario que pueda comunicarse de forma inalámbrica y que pueda actuar en base a lo que le indique robot R17 mediante su protocolo de comunicación (Roboforth II) o bien establecer su configuración por medio de un agente dentro del ecosistema Robotat. Además, es importante darle la capacidad al gripper de controlar la fuerza que aplica sobre los objetos, para permitir la manipulación de objetos de distintas fragilidades.

Se desea evaluar la factibilidad de diseñar un gripper altamente habilidoso para el robot R17 ya que dicho robot será un agente que formará parte del ecosistema Robotat. A continuación se presentan investigaciones previas en donde se realizó el diseño de grippers o efectores finales más modernos que el original del robot R17 así como el proyecto de investigación que sentó las bases del ecosistema Robotat que se quiere poner en funcionamiento en la universidad.

2.1. BLT Gripper: An Adaptive Gripper With Active Transition Capability Between Precise Pinch and Compliant Grasp

En este artículo se describe el diseño de un gripper de tres dedos y 5 grados de libertad realizado en 2020, el cual es capaz de adaptarse a diferentes configuraciones mediante el cambio en la orientación de sus dedos y de esta manera asegurar el agarre más eficiente que puede lograr según el objeto que se desea manipular. Además, permite realizar dos diferentes tipos de agarre, el primero es un agarre tipo pinza y el segundo es un agarre capaz de envolver al objeto. Gracias a la versatilidad de este gripper, permite tener una mayor cantidad de objetos que puede manipular aumentando así las aplicaciones en donde el robot puede operar. Cabe mencionar que los autores recomiendan la implementación de sensores tanto de torque como de fuerza para lograr tener un mejor control y rendimiento [1].



Figura 1: Gripper BLT [1].

2.2. Optimal design of a soft robotic gripper for grasping unknown objects

En este artículo presenta un estudio realizado en 2018 en donde realizan el diseño de un gripper de dos dedos con el fin de manipular diferentes objetos de distintos tamaños. El gripper diseñado es capaz de deformarse elásticamente gracias a su método de fabricación (impresión 3D con un filamento flexible). Gracias a esto, el gripper puede tener un agarre variable y adaptable al objeto que se está manipulando. No obstante, indican que se debe mejorar la velocidad de actuación, reducir el tamaño del gripper y aumentar su capacidad de carga [2].

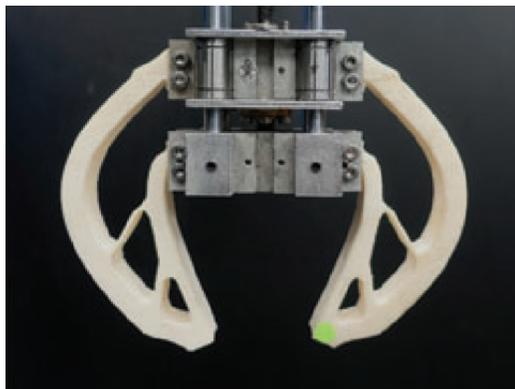


Figura 2: Diseño final del soft gripper [2].

2.3. Megaproyecto GC-R17: Sistema háptico de control a distancia

Este proyecto fue realizado en la Universidad del Valle de Guatemala en 2009 y consistió en elaborar un sistema háptico para controlar el brazo robótico R17 de manera inalámbrica. Asimismo, en este proyecto se diseñó un efector final para el R17 con 3 dedos y un grado de libertad por cada dedo, cuyo diseño fue inspirado en una mano humana. Además se implementó ZigBee como protocolo de comunicación inalámbrica entre el sistema háptico (guante con sensores) y el efector final. Sin embargo, las aplicaciones del proyecto son limitadas a las descritas en el trabajo ya que tanto el brazo robótico como el efector final del mismo cumplen la única función de seguir el movimiento del sistema háptico. [3].

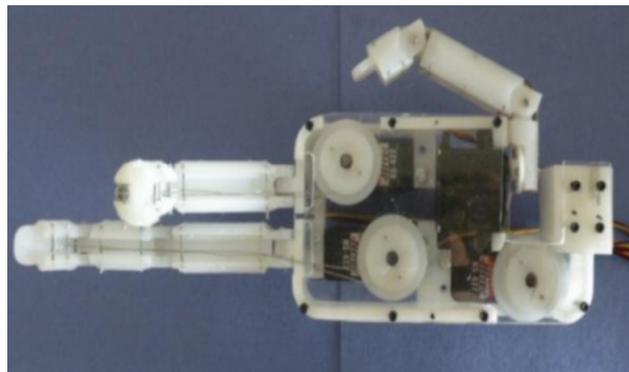


Figura 3: Efector final utilizado en el megaproyecto [3].

2.4. Diseño e implementación de una red de comunicación WiFi e interfaz gráfica para una mesa de pruebas de robótica de enjambre

Este trabajo de graduación fue realizado en la Universidad del Valle de Guatemala en 2020 y representa la fase anterior del ecosistema de robótica que se desea implementar. En el trabajo se describe el diseño de una red de comunicación bidireccional por medio de WiFi, la cual es la base de la comunicación que se usará en el ecosistema de robótica. Con esto se busca que los agentes o robots involucrados en el ecosistema logren interactuar entre sí. Cabe mencionar que en el proyecto se implementó el protocolo MQTT de comunicación WiFi, el cual fue desarrollado en la placa ESP8266 [4].

Actualmente el robot R17 no posee un efector final útil, lo que ha causado que la única función que el robot puede cumplir es la de generar movimiento para visualizar el sistema. Con el fin de darle un mayor campo de aplicaciones al robot R17 y de darle más valor como herramienta, este debe tener un efector final útil. Las aplicaciones en las que se puede utilizar un brazo robótico dependen fuertemente de su efector final, puesto que este componente es el medio por el cual un robot de este tipo puede interactuar con objetos. Asimismo, tener un gripper más moderno le da la capacidad al robot de manipular una amplia variedad de objetos y de tener un mejor control sobre el uso de su gripper. Sin embargo, no es una opción volver a usar el gripper original principalmente por estar desactualizado y porque necesita de un compresor para poder operar y no se tiene en mente hacer las instalaciones necesarias en el laboratorio para hacer funcionar a un gripper de este tipo. Por otro lado, el gripper diseñado en el megaproyecto GC-R17 [3] no puede ser utilizado para realizar tareas distintas a las propuestas en dicho proyecto, dado que el objetivo era diseñar un efector final funcional y no buscaba la versatilidad del mismo.

Adicionalmente, parte de el equipo que se quiere utilizar en el ecosistema Robotat incluye tanto al robot R17 como al sistema de captura de movimiento, lo cual abre las puertas a que el robot R17 pueda ser empleado en nuevas aplicaciones. Por lo que el diseño de un gripper actualizado y capaz de integrarse al ecosistema será de gran utilidad.

Con referencia a lo mencionado, este proyecto le permitirá al robot R17 la posibilidad de tener un mayor uso en este nuevo entorno y, de igual manera, abrir la oportunidad de poder ser utilizado en nuevas aplicaciones y futuros proyectos que requieran de una interacción más compleja, ya sea manipulando diversos objetos o colaborando con distintos agentes dentro del ecosistema.

4.1. Objetivo general

Desarrollar un gripper para el brazo robótico R17 que sea capaz de operar en el ecosistema del Robotat.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y manufacturar un gripper altamente habilidoso que permita controlar su fuerza y cuya pose sea detectable por el sistema de captura de movimiento Optitrack.
- Diseñar e implementar un sistema electrónico de distribución de potencia y control que permita la actuación del gripper mediante el lenguaje de programación Roboforth II de ST Robotics.
- Integrar el gripper a un sistema de captura de movimiento y comunicación inalámbrica que permita establecer su configuración y obtener la pose del efector final.

El presente trabajo de graduación se enfoca en realizar un gripper capaz de utilizarse como efector final en el robot R17 que se encuentra en la universidad. Se busca que dicho gripper sea funcional y que le brinde al robot R17 la capacidad de manipular objetos, por lo que no se pretende indagar en métodos o técnicas de sujeción poco convencionales, pero se espera que el gripper sostenga objetos de distinta fragilidad, geometría, peso y dimensiones.

Es importante recalcar que el desarrollo de un protocolo de comunicación inalámbrica o WiFi para utilizarse dentro del ecosistema del Robotat no forma parte de este trabajo, esto será desarrollado por otro estudiante. Sin embargo, el gripper sí tiene que ser capaz de implementar un protocolo de comunicación inalámbrica ya que se desea que este sea un agente dentro del ecosistema Robotat. Tampoco es parte del trabajo desarrollar un algoritmo que interprete la información entregada por el sistema de captura de movimiento, esto será desarrollado por otro estudiante.

Cabe mencionar que parte de los componentes electrónicos que fueron solicitados por parte de la universidad no han sido entregados por lo que se utilizaron componentes provisionales, los cuales en algunos casos pueden afectar los resultados del proyecto. Por otra parte, la situación provocada por la pandemia COVID-19 dificultó y atrasó el trabajo en el laboratorio.

6.1. Efectores finales

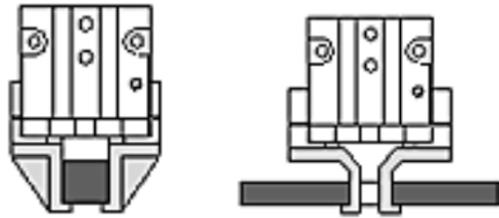
En robótica, se le conoce como efector final o elemento terminal al dispositivo periférico que se une a la muñeca del robot, el cual le permite al robot interactuar con su entorno. Este dispositivo le permite al robot de uso general realizar una tarea específica, por lo que son diseñados específicamente para una aplicación. Cabe mencionar que parte importante de su diseño es tomar en cuenta parámetros tales como como peso (ya que afectará al robot), el equipo de accionamiento y la capacidad de control que se desea utilizar, lo cual depende mucho de la aplicación para la que se requiera. Existen muchos tipos de efectores finales, pero generalmente se pueden clasificar en dos categorías: de manipulación y de herramienta [\[5\]](#).

6.1.1. Efectores finales de manipulación

Este tipo de efectores finales cumplen la función de sujetar objetos y su diseño depende mucho de la manipulación a realizar, el peso, la forma, el tamaño del objeto, la fuerza necesaria a ejercer, entre otros. Para cumplir esta función hay una diversidad de métodos de sujeción que pueden utilizarse, entre los cuales se encuentran los impactantes o impactive, penetrantes o ingressive y astrictivos o astrictive.

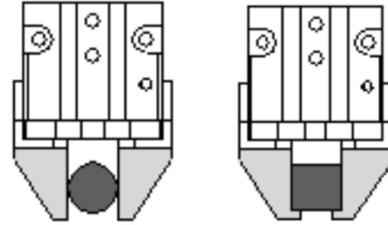
Impactantes (Impactive)

Este tipo de grippers son todos aquellos cuya generación de fuerza de retención está basada en física clásica o newtoniana, y generalmente involucran cierta complejidad en el mecanismo que utilizan. Son el tipo de gripper más utilizado, normalmente poseen entre 2 y 4 dedos que se mueven de manera sincronizada. Son adecuados para el control de fuerza, al igual que son bastante confiables y adaptables al modo de operación que se requiera. El



(a) Agarre externo. (b) Agarre interno.

Figura 4: Tipos de agarre [7].



(a) Por fricción. (b) Por retención.

Figura 5: Generación de agarre [7].

agarre puede ser aplicado de manera interna o externa, además, el agarre puede darse por fricción o retención [6].

Agarre externo: Es en donde el gripper sujeta al objeto al ejercer una fuerza hacia adentro, se cierra (Figura 4a).

Agarre interno: Aquella en donde el gripper sujeta al objeto al ejercer una fuerza hacia afuera o al momento de abrirse (Figura 4b).

Agarre por fricción: Se da cuando todas las superficies del gripper que hacen contacto con el objeto se encuentran paralelas entre sí, esto provoca que el gripper provoque aplastamiento sobre el objeto (Figura 5a).

Agarre por retención: Esta forma de agarre se da cuando no todas las superficies del gripper que hacen contacto con el objeto se encuentran paralelas entre sí, esto da la impresión de que el gripper envuelve al objeto con las piezas mecánicas (Figura 5b).

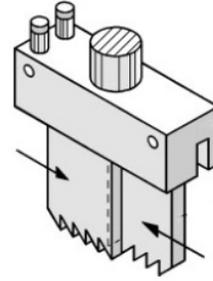
La forma de accionamiento de esta clase de gripper puede ser neumática, eléctrica o hasta piezoeléctrica, ya sea por medio de actuadores lineales o rotacionales. Sin embargo, el accionamiento eléctrico ofrece la versatilidad para ejercer un control más exacto del gripper [6].

Penetrantes (Ingressive)

Este tipo de grippers son todos aquellos que se impregnan o permean en la superficie de un material hasta cierta profundidad para lograr manipularlos. Este método de agarre incluye formas intrusivas tales como pines, agujas o ganchos que penetran el material (Figura 6a) y mecanismos no intrusivos que de cierta manera pellizcan el material (Figura 6b). Estos grippers se utilizan casi exclusivamente para manipular materiales suaves o flexibles (generalmente no rígidos), principalmente telas o tejidos, materiales fibrosos o esponjas. Esta forma de sujeción se caracteriza por aplicarse sobre una única superficie y sostener el material sin estar aplicando constantemente una fuerza [6].



(a) Gripper penetrante intrusivo [8].



(b) Gripper penetrante no intrusivo [6].

Figura 6: Ejemplo de grippers penetrantes.

Astrictivos (Astrictive)

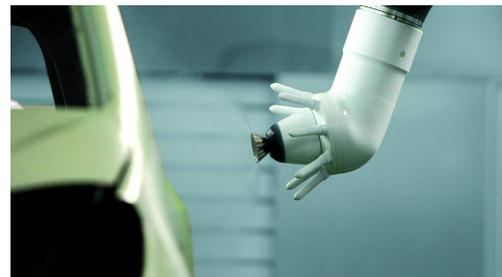
Estos grippers son capaces de mantener un agarre continuo sin generar esfuerzos de compresión en los objetos. El método más antiguo y común que utilizan estos grippers es el de succión por vacío, otros métodos incluyen formas de adherencia magnética y eléctrica. Sin embargo, la mayoría de los métodos utilizados por grippers de este tipo requieren de una fuente de energía continua para poder mantener el agarre [6].

6.1.2. Efectores finales de herramienta

Este tipo de efectores finales se utiliza cuando se desea que el robot realizar una operación en la pieza de trabajo. Esto engloba todo tipo de aplicaciones en las cuales no se requiera que el robot manipule objetos. Algunos ejemplos de robots que utilizan este tipo de efectores finales incluyen robots de soldadura, de pintura, de corte, de maquinado, entre otros [7].



(a) Eefector final de soldadura [9].



(b) Eefector final de pintura [10].

Figura 7: Ejemplo de efectores finales de herramienta.

6.2. Mecanismos para grippers

Los mecanismos para grippers normalmente cumplen por lo menos los siguientes dos requerimientos:

- Los elementos que retienen el objeto deben moverse de una manera muy bien definida, la cual regularmente está asociada a dicho objeto [6].
- El movimiento de los elementos de retención debe estar relacionado directamente con algún tipo de actuador [6].

En esencia, lo que se busca con estos mecanismos es que se genere un movimiento de sujeción a partir de un movimiento rotacional o lineal proveniente de los actuadores. Algunos de los mecanismos utilizados en grippers se muestran en la Figura 8. De donde es sencillo identificar que en su mayoría la sujeción se da por algún tipo de movimiento paralelo, angular o movimiento planar general. Los mecanismos utilizados por los dedos de los grippers son generalmente de un grado de libertad, pero esto no necesariamente implica que el gripper sea de un grado de libertad [6].

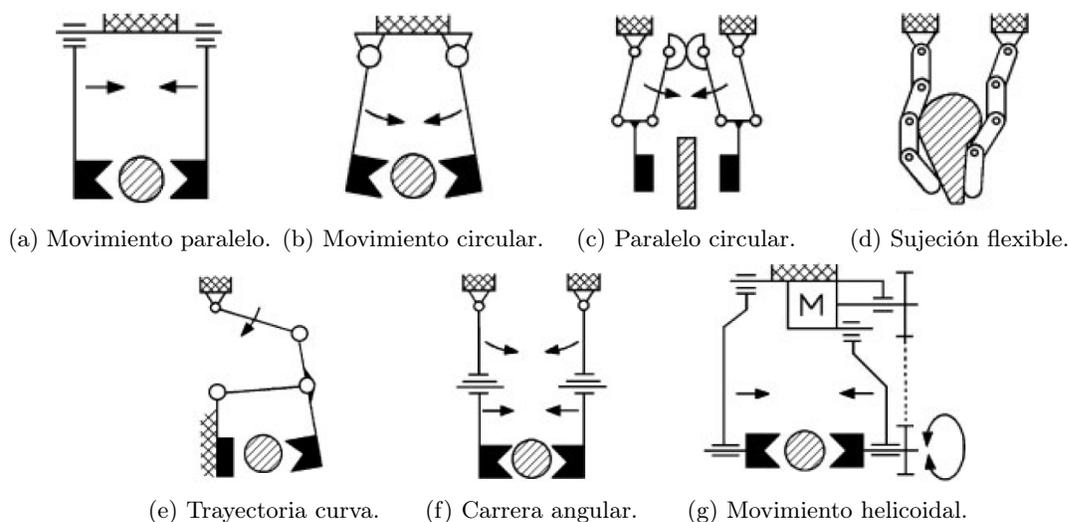


Figura 8: Mecanismos típicos para grippers [6].

6.2.1. Grippers de movimiento paralelo

Este tipo de grippers, como su nombre lo indica, hacen la sujeción por medio de un movimiento paralelo de sus piezas encargadas de realizar el agarre. La construcción de mecanismos para grippers de este tipo con un solo actuador son bastante simples, además son generalmente mecanismos robustos y que soportan fuerzas de sujeción altas. La mayoría de mecanismos para este tipo de grippers presenta movimiento sincronizado entre los dedos, por lo que la sujeción se da hacia el centro del mecanismo, sin embargo, es posible tener movimiento independiente de cada dedo [6]. Mecanismos básicos que generan movimiento

paralelo a partir de actuadores lineales se pueden apreciar en la Figura 9, por otra parte, en las Figuras 10 y 11 se muestran otro tipo de mecanismos que generan movimiento paralelo.

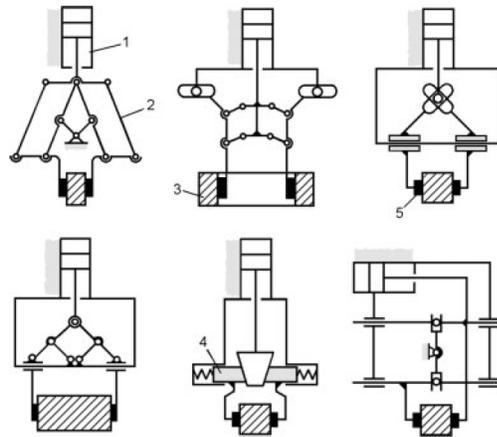


Figura 9: Mecanismos típicos de movimiento paralelo a partir de movimiento lineal [6].

1 actuador lineal, 2 brazo de palanca, 3 pieza de trabajo, 4 seguidor de leva
5 dedos de gripper.

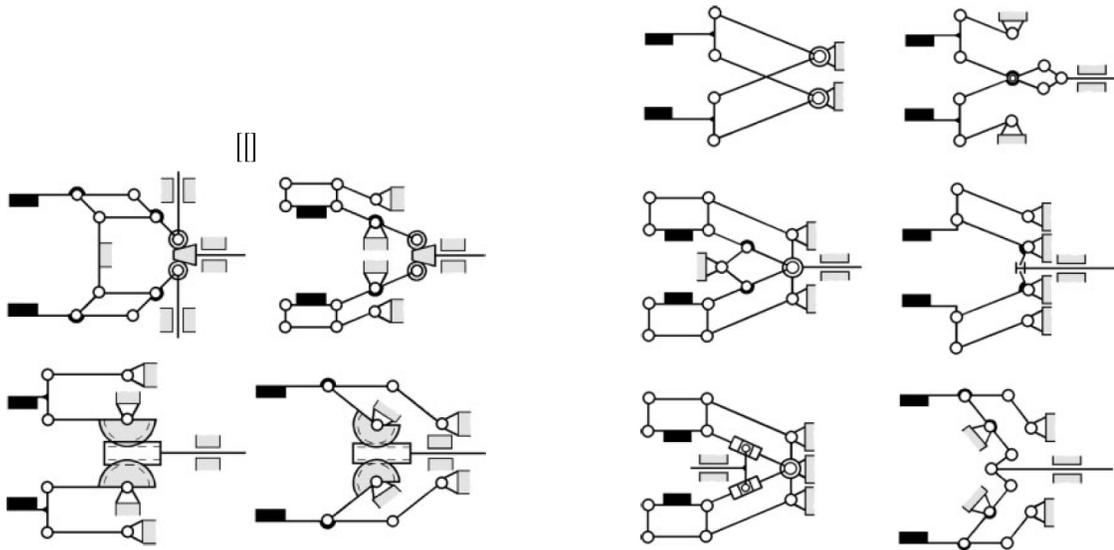


Figura 10: Mecanismos de movimiento lineal con traslación circular [6].

Figura 11: Otros mecanismos de movimiento lineal con traslación circular [6].

6.2.2. Grippers de movimiento angular

Los grippers de movimiento angular se caracterizan por la trayectoria curva que generan las piezas de sujeción. Su rango de operación llega hasta 90° , lo cual da la ventaja de poder manipular una mayor cantidad de objetos, sin embargo, es un problema si no se cuenta con mucho espacio. Generalmente estos mecanismos son más simples y baratos, existe una gran

variedad de mecanismos de este tipo [6]. Algunos ejemplos se muestran en las Figuras 12 y 13.

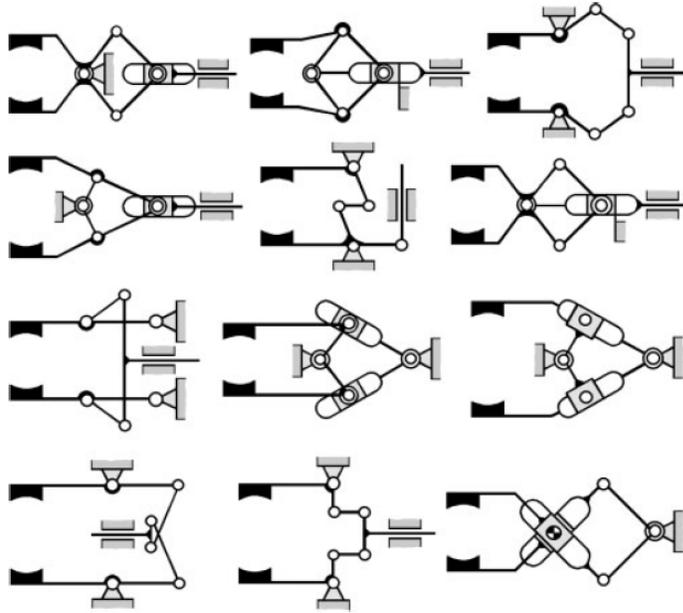


Figura 12: Mecanismos de grippers con movimiento angular [6].

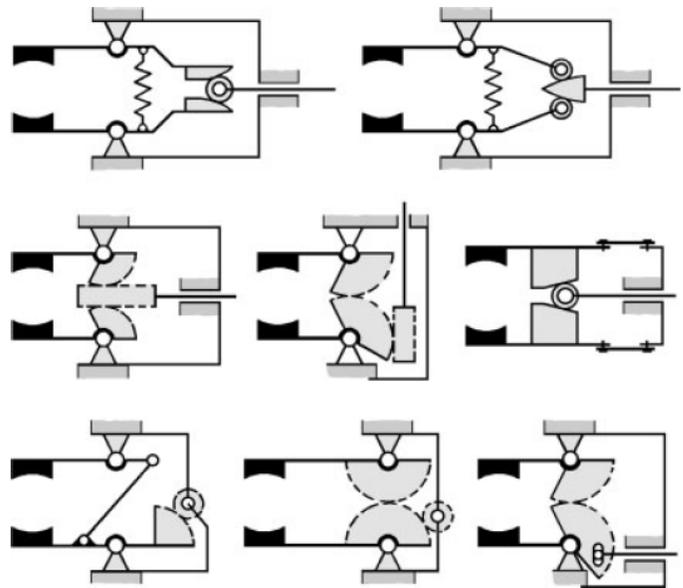


Figura 13: Mecanismos de grippers con movimiento angular [6].

6.2.3. Grippers de movimiento radial

Estos grippers también conocidos como céntricos o de auto centrado son, en su mayoría, grippers de 3 dedos los cuales son capaces de alinear el objeto con el eje del gripper. Son comúnmente utilizados para manipular objetos de forma cilíndrica y pueden cerrarse de manera paralela o a lo largo de una trayectoria curva [6]. Algunos ejemplos específicos para este tipo de mecanismos se muestra en la Figura 14.

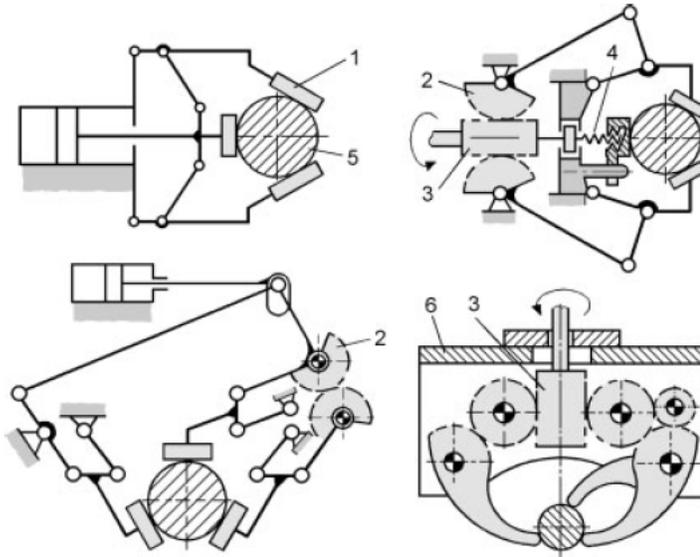


Figura 14: Mecanismos de movimiento radial [6].

1 dedos del gripper, 2 segmento dentado, 3 tornillo sinfin, 4 eje roscado, 5 pieza de trabajo, 6 carcasa del gripper.

6.3. Análisis de posición de mecanismos

Es importante que al terminar de diseñar un mecanismo tentativo, este sea analizado. Este análisis se puede realizar mediante diferentes métodos. Pueden utilizarse métodos gráficos o se pueden derivar ecuaciones generales de movimiento y resolver estas expresiones analíticas. Si bien cada método tiene sus ventajas, lo más sencillo es recurrir al software para resolver el análisis [11].

El análisis gráfico consiste en dibujar el mecanismo a escala con cautela utilizando regla, compás y transportador en alguna posición preestablecida o específica. De esta manera, únicamente se deben medir los ángulos no conocidos de los eslabones con respecto a un sistema de coordenadas y se obtiene la solución. Sin embargo, la precisión de este método dependerá fuertemente del cuidado, habilidad para dibujar y limitaciones de las herramientas de trabajo [11].

Los métodos algebraicos consisten en generar un algoritmo que representen las coordenadas de los puntos dentro del mecanismo en función de ciertos parámetros y partir de esto para generar nuevas ecuaciones y manipularlas hasta conseguir la solución o variables

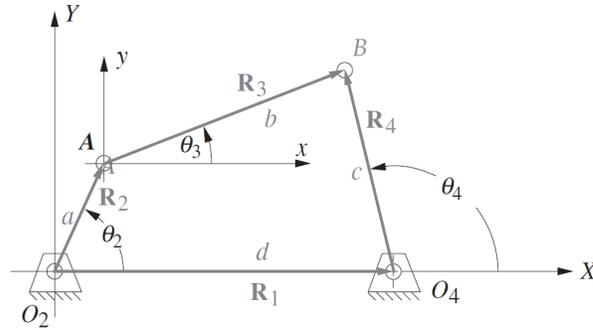


Figura 15: Lazo vectorial de posición de un mecanismo de 4 barras [11]

buscadas [11].

Otro método de análisis de posición consiste en crear un lazo vectorial alrededor del eslabonamiento. De esta manera los eslabones se representan como vectores de posición, un ejemplo de esto se puede observar en la Figura [15], en donde se representa a un mecanismo de 4 barras. Es sencillo apreciar que el lazo vectorial se cierra sobre sí mismo, lo que indica que la suma de los vectores es cero. Las longitudes de los vectores son equivalentes a las longitudes de los eslabones y de igual manera se pueden definir con el(los) ángulo(s) de entrada del mecanismo [11]. Cabe mencionar que las soluciones de los mecanismos más comunes ya se encuentran parametrizadas [11], lo cual hace de este método el ideal para analizar mecanismos.

6.4. Control de fuerza

El control de fuerza en grippers se da por el constante contacto físico con objetos y por la necesidad de manipularlos de manera eficiente. En esencia, el control de fuerza en grippers permite controlar la fuerza de agarre que se ejerce sobre el objeto. Es importante tener un control de fuerza en los grippers ya que esto facilita la manipulación de objetos de distintos pesos, material, fragilidad, etc. Una forma sencilla y eficiente de lograr el control es utilizar lo denominado como control por retroalimentación negativa. Este tipo de control es muy útil para lograr que un sistema se pueda controlar de manera automática. Es eficiente gracias a que constantemente está recibiendo información de la salida controlada, lo cual permite calcular la diferencia o error que se tiene con respecto a la referencia y aplicar el control con base en esto. El control por retroalimentación negativa también se denomina control en lazo cerrado. La representación de este tipo de control se muestra en la Figura [16], en donde $R(s)$ representa la referencia, $E(s)$ representa el error o diferencia entre la salida y la referencia, $C(s)$ representa al controlador, $G(s)$ representa a la planta o el sistema a controlar, $Y(s)$ representa la salida del sistema y $H(s)$ representa el sensor o sistema encargado de leer la salida [12].

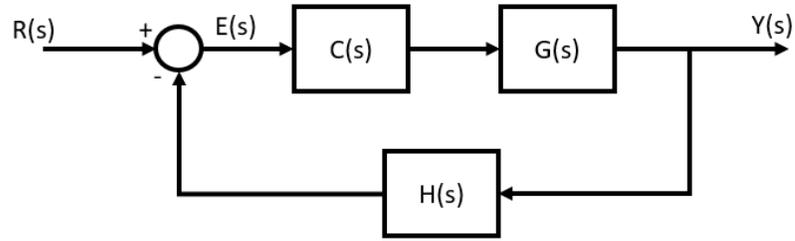


Figura 16: Diagrama de bloques retroalimentación negativa (basado en [12]).

6.5. Robot R17

El robot R17 (Figura [17]) es un brazo robótico articulado de 5 ejes (ver Figura [18]) fabricado por la compañía ST Robotics, el cual ofrece un alcance de 750mm. Es ideal para procesos que requieran un largo alcance o acceso difícil. Además, se indica que es fácil de programar, aplicar y a la vez es capaz de realizar tareas complejas. Utiliza motores paso a paso (stepper) y cada movimiento del robot R17 es controlado por codificadores, los cuales detienen el movimiento en caso de alguna colisión. Las especificaciones del robot R17 se encuentran en el Cuadro [1]. Además, la resolución nominal en el efector final es de 0.1mm o mejor [13].

El robot posee varios componentes, dentro los cuales está controlador Mk5 el cual utiliza una asociación de microprocesadores de CPU, DSP y unidades compactas MOSFET. Además se incluye un gripper neumático, el cual se puede intercambiar con algún otro efector final, siempre y cuando se ajuste al adaptador que el robot R17 posee (Figura [19]). Además,



Figura 17: Robot R17.

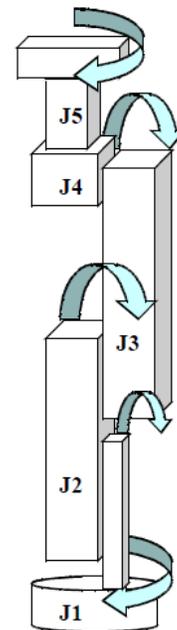


Figura 18: Ejes de robot R17.

el robot R17 presenta un *teach box*, el cual sirve para mover al robot de forma manual y de cierta manera enseñarle al robot la nueva posición [13].

Robot R17 de 5 ejes	
Motores	Posee motores paso a paso híbridos micro-escalonados (paso de 0.18°) de alta potencia con encoders integrados.
Alcance	750mm en cualquier dirección, rotación de 360° en cintura (J1)
Carga útil	Carga nominal 2kg/4.4lbs, carga máxima 3kg/6.6lbs
Repetibilidad	0.2mm
Caída de precisión a 500mm con carga nominal	1mm
Caída de precisión a alcance máximo con carga máxima	6mm
Velocidad máxima	Cintura (J1) 150 grados/seg, Hombro (J2) 90 grados/seg, Codo (J3) 130 grados/seg, Mano (J4) y muñeca (J5) 320 grados/seg. El efector final aproximadamente 800 mm/s
Par máximo	2Nm
Peso	Robot R17 22kg/49lbs, controlador 11.1kg/25lbs
Alimentación	110/240V AC, 420 VA
Ambiente de trabajo	IP 54A, 0 - 40°C
MTFB (<i>mean time between failures</i>) o tiempo de vida útil promedio	20,000 horas, aproximadamente más de un millón de ciclos
Materiales y acabado	Capa de polvo blanco con cubiertas de plástico ABS blancas modeladas al vacío.

Cuadro 1: Características del robot R17 [13].

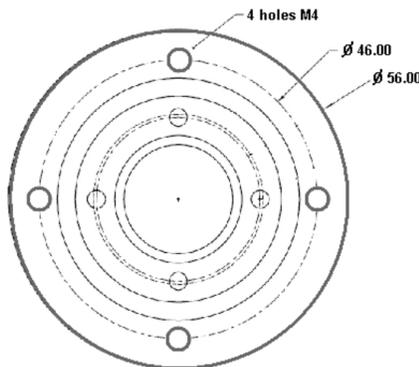


Figura 19: Adaptador de gripper del robot R17 [13].

6.5.1. Comunicación del robot R17

El lenguaje de programación que utiliza es Roboforth II de ST Robotics, facilitado por el programa ROBOWIN el cual es el software diseñado para comunicarse con el controlador Mk5 y de esta manera programar el robot R17. Esto hace al robot sencillo de programar y versátil ya que permite programar los movimientos, interfaces y periféricos complejos [13].

Roboforth II es un lenguaje de programación de robots extensivo diseñado para que el robot pueda cumplir con cualquier eventualidad que se pueda requerir al momento de su uso. Este lenguaje permite varias maneras de adquirir información espacial y posee diversas características que facilitan la interfaz con periféricos digitales de entrada y salida que pueden operarse en simultáneo junto con el control del robot. La mayor facilidad que presenta Roboforth II es que se parece a un lenguaje real, lo que significa que los comandos que se utilizan para programar son palabras provenientes de un extenso vocabulario que trae incorporado. Los comandos se pueden interpretar fácilmente sin necesidad de conocer algún lenguaje de programación [14].

Roboforth está organizado como una lista de palabras vinculadas (conocida como el diccionario). De esta manera, al recibir una palabra de comando el software relaciona la palabra a una acción codificada que el robot o máquina puede interpretar. Programar en Roboforth consiste en añadir nuevas palabras al diccionario en términos de otras ya existentes. Estas nuevas palabras también pueden contener información (por ejemplo de la posición) [14].

Cualquier posición del robot puede describirse como coordenadas relativas a una posición central conocida como "Home position". Roboforth permite describir estas coordenadas en términos de movimiento de los motores o pasos de los motores necesario para llegar a cierto punto desde la posición central. Además, se aceptan coordenadas cartesianas en milímetros para expresar posiciones del robot. Cada posición se guarda en una lista de 16 bytes que también incluyen banderas para indicar el formato en que se guardó la posición (pasos de motor, coordenadas cartesianas, etc.). Con Roboforth existen múltiples maneras de mover el robot y de utilizar su función de teach. Todos los movimientos y posiciones guardados en palabras son usadas posteriormente para crear el programa que definen la función global del robot. Por otra parte, los errores que sucedan pueden reprogramarse para indicar que realiza el robot al momento que suceda alguna eventualidad [14].

6.6. Motor Dynamixel AX-12A

Es un servomotor digital fabricado por la empresa Robotis capaz de controlar su velocidad, posición, temperatura, torque y voltaje, por lo que es parte del tipo de motores que se denominan actuadores inteligentes o smart servos. Los motores Dynamixel AX-12A trabajan con el protocolo llamado Dynamixel protocol 1.0, el cual es un protocolo de comunicación serial half dúplex asíncrono, con data de 8 bits, 1 bit de parada, 1 bit de inicio y ningún bit de paridad. Estos motores por defecto poseen un ID igual a 1 y un baud rate de 1Mbps, cabe mencionar que los motores pueden operar a distintos baud rates sin presentar problemas (ver Cuadro 2) y se les puede modificar el ID [15]. Las especificaciones de estos motores se pueden apreciar en el Cuadro 3.

Valor	Baud Rate (bps)	Margen de error
1	1M	0.00 %
3	500,000	0.00 %
4	400,000	0.00 %
7	250,000	0.00 %
9	200,000	0.00 %
16	115,200	-2.124 %
34	57,600	0.794 %
103	19,200	-0.160 %
207	9,600	-0.160 %

Cuadro 2: Porcentaje de error de los baud rates del servomotor AX-12A [15].

Dynamixel AX-12A	
Peso	54.6g
Dimensiones	32x50x40 mm
Resolución	0.29°
Ángulo de giro	0 - 300°, giro sin fin
Motor	Núcleo de cobre
Relación de engranajes	254:1
Par de parada	1.5Nm (a 12V 1.5A)
Velocidad sin carga	59rpm (a 12V)
Temperatura de operación	Entre -5 y +70°C
Voltaje de entrada	9 - 12V (11.1V recomendado)
Señal de control	Paquete digital
Conexión física	Bus de conexión multiple TTL
ID	0 - 253 ID
Material de engranajes y recubrimiento	Plástico de ingeniería

Cuadro 3: Características del servomotor AX-12A [15].

Estos motores permiten su conexión en serie gracias al protocolo de comunicación que utilizan y a su pinout (Cuadro 4) con doble header. Por otra parte, las dimensiones físicas de los mismos se muestran en la Figura 20 y las direcciones de memoria EEPROM y RAM se muestran en los Cuadros 5 y 6 respectivamente.

Ítem	Ilustración
Pinout	
Diagrama	
Entrada	
Header PCB	

Cuadro 4: Características del pinout del servomotor AX-12A [15].

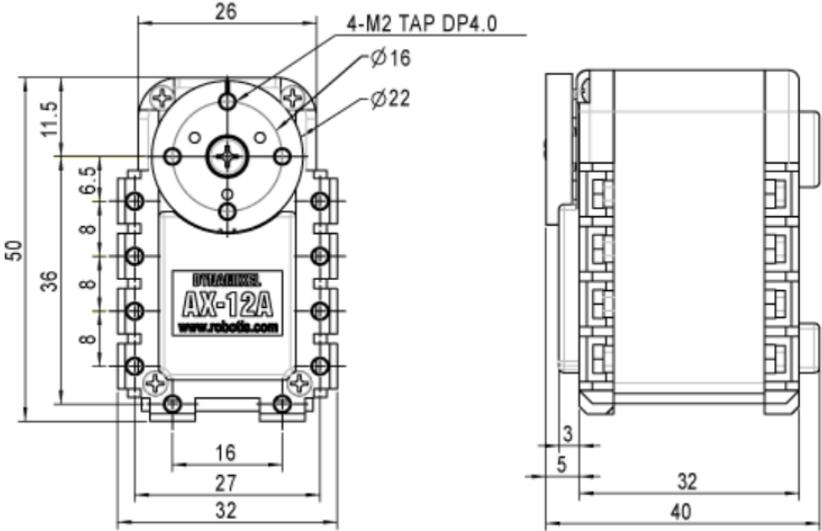


Figura 20: Dimensiones del servomotor AX12-A [15].

Dirección	Número de bytes	Nombre	Descripción	Lectura (R) Escritura (W)	Valor inicial
0	2	Número de modelo	Número de modelo	R	12
2	1	Versión de firmware	Versión de firmware	R	-
3	1	ID	Dynamixel ID	RW	1
4	1	Baud Rate	Velocidad de comunicación	RW	1
5	1	Tiempo de retraso de retorno	Tiempo de demora en responder	RW	250
6	2	Límite angular CW:	Límite rotacional a favor de las agujas del reloj	RW	0
8	2	Límite angular CCW:	Límite rotacional en contra de las agujas del reloj	RW	1023
11	1	Límite de temperatura	Límite máximo de temperatura interna	RW	70
12	1	Límite inferior de voltaje	Voltaje mínimo aceptado a la entrada	RW	60
13	1	Límite superior de voltaje	Voltaje máximo aceptado a la entrada	RW	140
14	2	Torque máximo	Torque máximo	RW	1023
16	1	Nivel de estado	Seleccionar información del estado a retornar	RW	2
17	1	Alarma LED	Uso de LED como alarma	RW	36
18	1	Apagado	Información de error de apagado	RW	36

Cuadro 5: Tabla de memoria EEPROM del servomotor AX12-A [15].

Dirección	Número de bytes	Nombre	Descripción	Lectura (R) Escritura (W)	Valor inicial
24	1	Habilitar torque	Encender/apagar torque del motor	RW	0
25	1	LED	Estado del LED	RW	0
26	1	Margen de cumplimiento CW	Error permitido entre la posición actual y la deseada	RW	1
27	1	Margen de cumplimiento CCW	Error permitido entre la posición actual y la deseada	RW	1
28	1	Pendiente de acercamiento CW	Pendiente de torque aplicado al acercarse a la posición deseada	RW	32
29	1	Pendiente de acercamiento CCW	Pendiente de torque aplicado al acercarse a la posición deseada	RW	32
30	2	Posición deseada	Posición angular objetivo	RW	-
32	2	Velocidad de movimiento	Velocidad de movimiento	RW	-
34	2	Límite de torque	Límite de torque	RW	Máx
36	2	Posición actual	Posición actual	R	-
38	2	Velocidad actual	Velocidad actual	R	-
40	2	Carga aplicada actual	Carga aplicada actual	R	-
42	1	Voltaje actual	Voltaje actual	R	-
43	1	Temperatura actual	Temperatura actual	R	-
44	1	Registro	Indica que la instrucción está registrada	R	0
46	1	Movimiento	Estado del movimiento	R	0
47	1	Bloqueo	EEPROM bloqueada	RW	0
48	2	Energía	Corriente mínima de umbral	RW	32

Cuadro 6: Tabla de memoria RAM del servomotor AX12-A [15].

6.6.1. Dynamixel Protocol 1.0

Este protocolo de comunicación se basa en el envío de paquetes para enviar y recibir información, existen dos tipos de paquetes, los de instrucción que envía el controlador y los de estado que los envía el motor como respuesta. Cuando varios motores están conectados al bus de datos se deben tener varios ID, uno específico para cada motor. De este modo el controlador puede enviar paquetes dirigidos a un servomotor en específico. En caso de que existan 2 ID iguales en el mismo bus, el paquete colisionará y ocurrirá un error en la comunicación. El paquete de instrucción está compuesto de los siguientes bytes en orden: encabezado 1, encabezado 2, ID, ancho de paquete, instrucción, parámetro 1, ..., parámetro N y un byte de revisión que es el byte menos significativo con los bits invertidos (*binary ones complement*) de la suma de los bytes enviados. Los encabezados tienen siempre el valor de 255, el ID va de 0 a 255, el ancho del paquete está dado por $L = \text{número de parámetros} + 2$. Las instrucciones se muestran en el Cuadro 7 y los parámetros incluyen dirección en memoria a la que se desea acceder y los datos que se envían en caso de ser necesario 16.

De manera similar, el paquete de estado está compuesto por los siguientes bytes en orden: encabezado 1, encabezado 2, ID, ancho de paquete, byte de error y un byte de revisión que es el byte menos significativo con los bits invertidos (*binary ones complement*) de la suma de los bytes enviados 16. De este paquete el ancho generalmente será 0x02 y la descripción del byte de error se muestra en el Cuadro 8.

Valor	Instrucción	Descripción
0x01	Consulta	Instrucción que revisa si el paquete llegó al dispositivo con el ID deseado
0x02	Leer	Instrucción para leer datos del dispositivo
0x03	Escribir	Instrucción para escribir datos en el dispositivo
0x04	Registrar instrucción	Instrucción que registra el paquete en estado de espera
0x05	Acción	Instrucción que ejecuta el paquete que fue registrada con anterioridad y se encontraba en estado de espera
0x06	Restablecimiento de fábrica	Instrucción que restablece la tabla de control a su configuración de fábrica
0x08	Reiniciar	Instrucción que reinicia Dynamixel (no está disponible en todos los dispositivos)
0x83	Escritura sincronizada	Para varios dispositivos, instrucción que escribe datos con el mismo largo y en la misma dirección de una sola vez
0x92	Lectura en conjunto	Para varios dispositivos, instrucción que escribe datos con diferente largo y en la misma dirección de una sola vez (no está disponible en todos los dispositivos)

Cuadro 7: Tabla de instrucciones del protocolo Dynamixel 1.0 16.

Bit	Error	Descripción
Bit 7	0	-
Bit 6	Error de instrucción	Se coloca en 1 si se envió una instrucción no registrada o si se desea ejecutar una instrucción en espera cuando no hay instrucciones en espera
Bit 5	Error de sobrecarga	Se coloca en 1 si no se puede controlar la carga con el torque establecido
Bit 4	Error de byte de revisión	Se coloca en 1 si el byte de revisión no corresponde al paquete recibido
Bit 3	Error de alcance	Se coloca en 1 si el uso de la instrucción está fuera de alcance
Bit 2	Error de sobrecalentamiento	Se coloca en 1 si la temperatura excede el límite establecido
Bit 1	Error de posición límite	Se coloca en 1 si la posición deseada se encuentra fuera de los límites establecidos
Bit 0	Error de voltaje de entrada	Se coloca en 1 si el voltaje de entrada está fuera del rango establecido

Cuadro 8: Tabla de descripción del byte de error del protocolo Dynamixel 1.0 [16].

Este protocolo utiliza comunicación serial half dúplex asíncrono, con data de 8 bits, 1 bit de parada, 1 bit de inicio y ningún bit de paridad, en donde el término half dúplex se refiere a que los pines RX y TX no se pueden utilizar al mismo tiempo, por lo que el controlador debe estar en modo de entrada a menos que se quiera transmitir un paquete de instrucción. Debido a esto es importante tomar en cuenta el tiempo de espera establecido entre cada transmisión de Byte, el cual es de 100ms o menos, de no ser así, los motores lo detectan como error y se debe comenzar la comunicación de nuevo [16].

6.7. Microcontrolador ESP32

El ESP32 es un microcontrolador desarrollado por la compañía Espressif Systems como sucesor del ESP8266, se caracteriza por tener un microprocesador con WiFi, Bluetooth y componentes RF integrados. Algunas de las especificaciones de este microcontrolador son las siguientes [17]:

- Doble o único núcleo de 32 bits LX6 microprocesador con frecuencia de reloj de hasta 240MHz.
- 520KB de SRAM, 448KB de ROM y 16KB de RTC SRAM.
- Soporta conectividad Wifi 802.11 b/g/n con velocidades hasta 150Mbps.
- Soporte de bluetooth clásico v4.2 y de especificaciones BLE.
- 34 GPIOs programables.

- Hasta 18 canales de 12 bits SAR ADC y 2 canales DAC de 8 bits.
- Conectividad serial que incluye los siguientes módulos: 4 SPI, 2 I2C, 2 I2S, y 3 UART.
- Ethernet MAC para comunicación LAN física (requiere componente externo).
- 1 módulo de esclavo para SPI y 1 controlador Host para SD/SDIO/MMC.
- 16 canales de PWM.
- Inicio seguro y con Flash cifrado.
- Aceleración de hardware criptográfica para AES, Hash (SHA-2), RSA, ECC y RNG.

Cabe mencionar que algunos de los entornos de programación más comunes para el ESP32 son: Arduino IDE, PlatformIO IDE (VS. Code), LUA, MicroPython, Espressif IDF (IoT Development Framework) y JavaScript. Debido a que el microcontrolador ESP32 por sí solo no puede implementarse en algún sistema embebido se debe usar una placa de desarrollo. El board ESP32 DevKit1 es de las opciones más comunes ya que posee el módulo ESP-WROOM-32, 2 filas de 15 pines IO, convertor CP2012 USB-UART, conector micro USB, regulador de 3.3V AMS1117, botón de Enable o Reset, botón boot para cargar el software, LED de alimentación, LED de usuario y componentes pasivos [17]. El pinout de dicho board se muestra en la Figura 21.

6.8. Captura de movimiento

La captura de movimiento es el proceso de grabar una serie de movimientos y guardarlos en términos matemáticos utilizables al rastrear puntos clave en el espacio a lo largo del tiempo para combinarlos y obtener una representación tridimensional del movimiento. Este

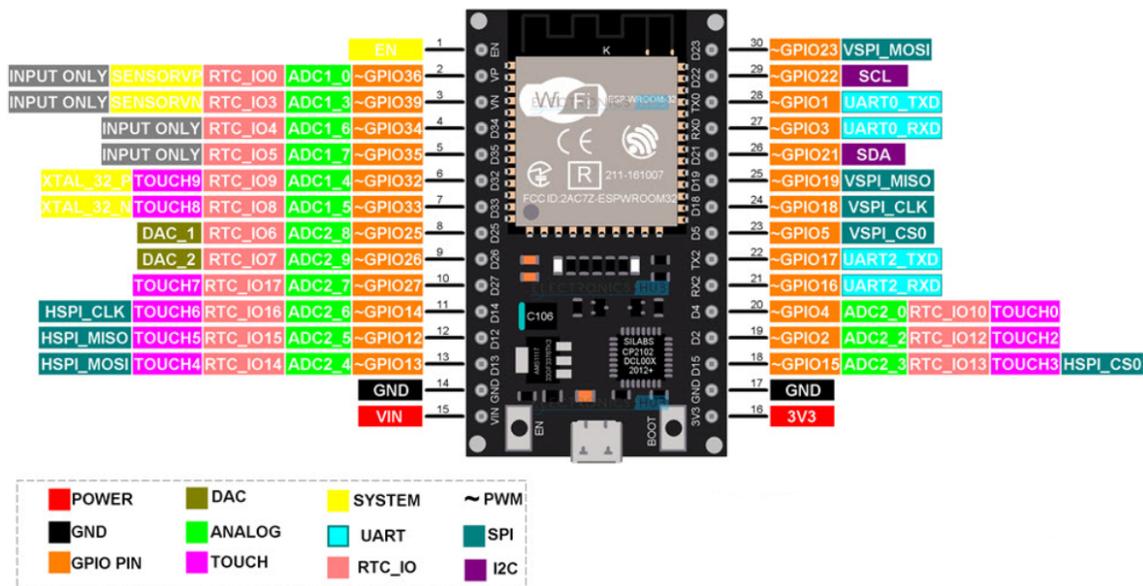


Figura 21: Pinout del board ESP32 [17].

proceso de traducir un movimiento en términos digitales lo hacen los sistemas de captura de movimiento. Para lograr los mejores resultados es esencial escoger bien los puntos clave que se van a rastrear, estos deben representar el movimiento completo por lo que estos puntos deben colocarse en áreas que mejor representen la actividad de todas las partes móviles del objeto. Estos puntos clave son localizados y rastreados por medio de sensores o cámaras especiales que detectan la luz emitida o reflejada por los puntos. Generalmente, la toma de datos se da en 2 dimensiones por lo que es necesario colocar los dispositivos de recolección de datos en diferentes vistas y mediante software se hace la relación entre los diferentes puntos de toma de datos para generar la información de posición en 3 dimensiones [18].

En el laboratorio de robótica de la universidad se posee un sistema de captura de movimiento proporcionado por la compañía Optitrack. Con este sistema se obtuvieron las cámaras modelo Prime 41 las cuales ofrecen una resolución de 2048x2048 a 180fps. Además, poseen una precisión de $\pm 0.1\text{mm}$ y una distancia de detección de 30m al utilizar marcadores pasivos (reflectivos) o una distancia de 45m al utilizar marcadores activos (puntos que requieren de energía) [19].

A continuación se describe la metodología utilizada para realizar el presente trabajo de graduación, la cual se describe de manera detallada. En esencia, el trabajo se puede dividir en las siguientes áreas:

- Diseño mecánico.
- Diseño electrónico.
- Desarrollo de firmware.
- Implementación de control de fuerza.
- Integración al ecosistema Robotat.

7.1. Diseño mecánico

Como parte del diseño mecánico se estableció el mecanismo que genera el movimiento de los dedos del gripper. Se utilizó el software de Geogebra [20] para simular el comportamiento del mecanismo en función de sus parámetros. Posteriormente, se realizó el análisis de síntesis de posición del mecanismo con el fin de tener el comportamiento descrito de una forma analítica. Por otra parte, se realizó el diseño 3D del gripper por medio del software de Autodesk Inventor [21]. Luego se procedió a fabricar las piezas diseñadas utilizando las impresoras 3D de la universidad, Ultimaker 3 y el software Ultimaker Cura [22] para generar los archivos de impresión. Cabe mencionar que se empleó PLA como filamento de impresión debido a su disponibilidad dentro de la universidad. Con las piezas fabricadas, se emplearon tornillos (con sus respectivas tuercas) como material de fijación gracias a que también pueden cumplir la función de juntas dentro del mecanismo. Por otro lado, se validó que el mecanismo del gripper cumpliera con la generación de movimiento establecida con anterioridad utilizando el software Tracker [23].

7.2. Diseño electrónico

El diseño electrónico del gripper consistió en construir un circuito de distribución de potencia y que a la vez facilite la comunicación entre el microcontrolador y los actuadores, ya que estos operan a diferentes voltajes. Además se diseñó y manufacturó una PCB para montar todo el circuito, esto se realizó con la ayuda del software Altium Designer [24] y la fresadora de PCB que se encuentra en la universidad. Cabe mencionar que se utilizó el equipo de soldadura de la universidad para soldar los componentes a la PCB, y equipo tal como el osciloscopio, generador de funciones y fuente de voltaje para probar el circuito. Los actuadores que se utilizaron son motores AX-12A los cuales fueron asignados por parte de la universidad para llevar a cabo el proyecto.

7.3. Desarrollo de firmware

Antes de comenzar a detallar la metodología que se siguió para desarrollar el firmware, es importante mencionar que se usará un ESP32 como microcontrolador. Cabe mencionar que se decidió utilizar este microcontrolador por soportar conectividad WiFi, lo cual es parte esencial para comunicarse dentro del ecosistema Robotat. Además se escogió por su alta capacidad ya que posee un procesador de 32 bits, con frecuencias de reloj de hasta 240MHz, en general, un microcontrolador de gama alta. No está demás decir que todos los agentes dentro del ecosistema Robotat utilizan al ESP32. Para programar el microcontrolador se utilizó el software de Visual Studio Code [25] con PlatformIO IDE y Github integrado a fin de estandarizar todas las librerías que utilizarán los agentes dentro del ecosistema Robotat. Por otra parte, integrarlo con Github facilitó la edición, registro y manejo de versiones del código, ya que se desean mantener todas las librerías bajo un mismo proyecto.

En primera instancia se creó la librería que permite controlar los motores Dynamixel AX-12A con el ESP32, en otras palabras se implementó el protocolo de comunicación de los motores en el ESP32. Esto implicó realizar pruebas de comunicación entre los motores y el ESP32, en donde fue de gran utilidad el equipo del laboratorio de la universidad tal como el generador de funciones, osciloscopio y fuente de voltaje. Para probar y tener una referencia del protocolo de comunicación que utilizan los motores, fue de gran utilidad la tarjeta OpenCM 9.04 (microcontrolador diseñado para utilizar los motores AX-12A) [26], así como el software RoboPlus y el dispositivo USB2Dynamixel que permiten el uso de los motores desde una computadora.

Posterior a realizar la librería, se implementaron las rutinas de control del gripper para establecer el movimiento deseado del mecanismo y dejarlo en función de parámetros para facilitar su integración a la comunicación inalámbrica.

7.4. Control de fuerza

Para implementar el control de fuerza se utilizaron dos sensores de fuerza FSR 402, los cuales se colocaron en la punta de la pinza y en la parte curva de la misma. Se utilizó

en esencia un control proporcional de velocidad, este fue implementado como un control proporcional con un término de **Feedforward**, el cual es la salida de control previa, y se detiene al momento de estar dentro del rango de una tolerancia definida. Posteriormente se probó el control implementado en donde se colocó un objeto elástico en las pinzas del gripper para poder apreciar el cambio de fuerza aplicada por el mismo.

7.5. Integración al ecosistema del Robotat

Esta última sección implica la integración del gripper al ecosistema del Robotat. Esto fue facilitado gracias al trabajo de graduación realizado por el estudiante Jose Pellecer [27], en donde se diseñó un módulo para volver al R17 un agente dentro del ecosistema, por lo cual se implementó comunicación bluetooth entre el módulo del R17 y el gripper para que este reciba comandos provenientes del módulo. De esta manera, el módulo recibe información del ecosistema y el módulo se encarga de trasladar la información al gripper o controlarlo según lo recibido. La conexión bluetooth se realizó por medio de un perfil de acceso genérico (GAP por sus siglas en inglés) y la forma de enviar información es via un perfil serial virtual (SPP por sus siglas en inglés). El protocolo de comunicación implementado fue diseñado para enviar paquetes de información del módulo del R17 hacia el gripper, en donde se envían dos comandos: el estado del gripper, abierto o cerrado y el valor de referencia de fuerza, un número con dos dígitos y un decimal. Posteriormente, se probó la robustez de la comunicación en donde se probó la velocidad de transmisión de los paquetes y la distancia en la cual no presentan problemas.

Por último, se probó que tan detectable es el gripper al sistema de captura de movimiento. Para esto se establecieron tres rutinas de movimiento con el R17 y se tomaron datos del sistema de captura de movimiento Optitrack para analizarlos y encontrar si existen problemas al momento de detectar el gripper.

8.1. Diseño mecánico

En esta sección se incluye todo lo relacionado con la parte mecánica del gripper, esto incluye el mecanismo de generación de movimiento, diseño de las piezas que componen al gripper y ensamblaje físico del mismo.

8.1.1. Mecanismo

Como primer punto se estableció el mecanismo de generación de movimiento para cada dedo del gripper. Se decidió utilizar un gripper de 2 dedos sobre un gripper de 3 dedos. Esta decisión se basó en el glstrade study que se muestra en el Cuadro 9, en donde se representa que los beneficios y versatilidad otorgada por un tercer dedo no aporta lo suficiente en comparación con el espacio que ocupa dentro del gripper.

La generación de movimiento de cada dedo se obtuvo con el mecanismo mostrado en la Figura 22, el cual es un mecanismo de 4 barras de doble manivela. Se definieron las posiciones de los puntos $O_2 = (0, 0)$, $O_4 = (4, -2)$, y los eslabones $a = 70mm$, $c = 70mm$ y $b = 44.72mm$ el cual es equivalente al eslabón d que une a los puntos O_2 y O_4 . Este mecanismo presenta un cierre tipo paralelo circular según la Figura 8, además, facilita el uso de actuadores rotacionales tales como los servomotores Dynamixel Ax12-A y a su vez presenta la gran ventaja de tener un cierre paralelo. El cierre paralelo permite mantener las superficies de contacto de las pinzas paralelas entre sí a lo largo de todo el movimiento de cierre del gripper. Esto puede resultar muy beneficioso al momento de sostener objetos con caras planas paralelas de diferentes dimensiones. En la sección de anexos se adjunta un enlace en el cual se puede interactuar con el movimiento del mecanismo.

Criterio	Peso	Mecanismo de 2 dedos	Nota	Mecanismo de 3 dedos	Nota
Tamaño	30 %	Utiliza entre 1 y 2 motores y 2 mecanismos para los dedos	5	Utiliza entre 3 y 4 motores y 3 mecanismos para los dedos	2
Consumo de corriente	10 %	Consumo de 1 o 2 motores	5	Consumo de 3 o 4 motores	2
Geometrías de sujeción	25 %	Permite sujetar geometrías con 2 caras planas incluyendo en algunos casos figuras cilíndricas	4	Permite sujetar geometrías esféricas y en algunos casos geometrías cilíndricas y con 2 caras planas	5
Versatilidad	20 %	Permite cambios generales pero no de mecanismo	3	Hace posible cambiar entre mecanismos de 2 y 3 dedos	5
Fuerza de sujeción	10 %	Permite el uso de 1 motor por dedo para aplicar fuerza	3	Permite el uso de un motor por dedo para aplicar fuerza	4
Estabilidad de sujeción	5 %	Presenta 2 puntos de contacto	3	Presenta 3 puntos de contacto	5
Puntuación	100 %	4.05		3.65	

Cuadro 9: Trade study de cantidad de dedos del gripper (notas sobre 5).

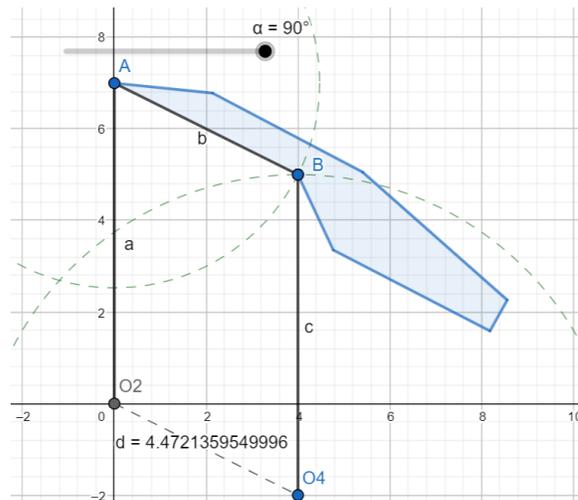


Figura 22: Mecanismo de cada dedo.

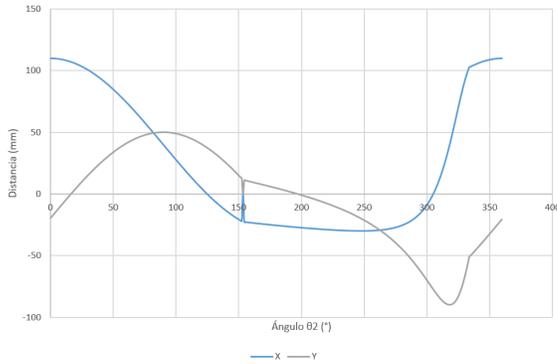


Figura 23: Coordenadas teóricas del punto B del mecanismo en función del ángulo de entrada θ_2 .

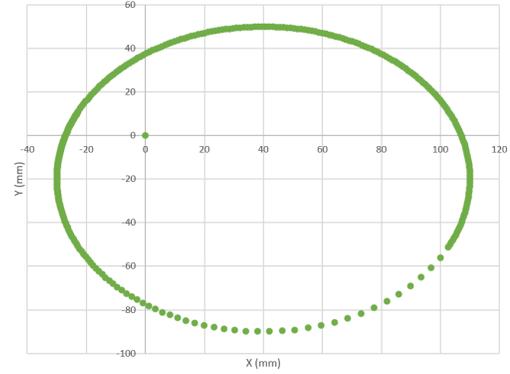


Figura 24: Trayectoria teórica del punto B del mecanismo.

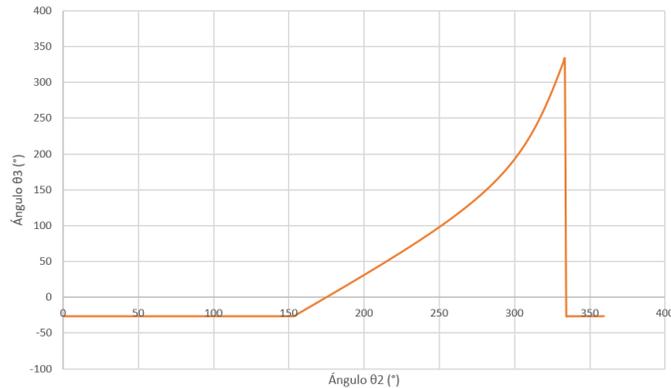


Figura 25: Ángulo del eslabón b en función del ángulo de entrada θ_2 .

Basado en el lazo vectorial mostrado en la Figura 15, se realizó el análisis de síntesis de posición del mecanismo. Es importante resaltar que el ángulo θ_2 representa el ángulo del motor y los vectores a , b , c y d los eslabones del mecanismo. Como resultado del análisis de síntesis de posición se obtuvieron las coordenadas x y y del punto B del mecanismo. Los puntos obtenidos se graficaron en función del ángulo de entrada en la Figura 23, en donde se identifica que el mecanismo presenta una posición de agarrotamiento alrededor de $\theta_2 = 153^\circ$ ejemplificado como un punto $(0, 0)$, además, se graficaron en la Figura 24 para representar la trayectoria del punto a lo largo de una revolución del ángulo θ_2 en el plano cartesiano. Por otra parte, se graficó el ángulo θ_3 en función de θ_2 en la Figura 25, en la cual se aprecia que θ_3 se mantiene constante siempre y cuando $153^\circ \nless \theta_2 \nless 334^\circ$ aproximadamente.

Ya que para esta aplicación únicamente importa el comportamiento que se da cuando $0^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ$, se puede decir que no se presentan ángulos de agarrotamiento y que el ángulo θ_3 es constante a lo largo de la trayectoria efectiva del mecanismo.

8.1.2. Diseño 3D

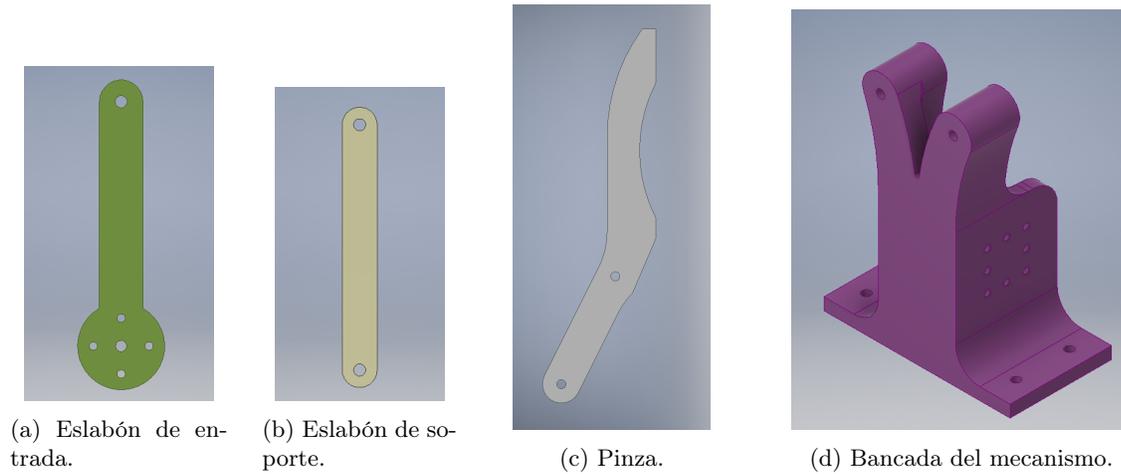


Figura 26: Piezas que componen el mecanismo de sujeción.

Con base en el mecanismo definido en la sección previa, se realizó el diseño 3D del gripper utilizando el software de Autodesk Inventor. Este se dividió en dos partes, la primera incluyó todo el mecanismo de sujeción y la segunda incluyó el acople al robot R17 en donde se ocultarán el resto de componentes electrónicos.

En principio se adaptó el mecanismo para utilizarse con los motores AX12-A, esto implicó adaptar el eslabón de entrada a la salida de los motores y crear una pieza de bancada que sujete tanto al mecanismo como a los motores. Para esto fueron útiles los agujeros roscados prefabricados y adaptadores que se incluyen con los motores AX12-A, por lo que solo fue necesario hacer coincidir los agujeros y adaptadores del motor a las dimensiones preestablecidas del mecanismo.

Además, parte importante del diseño del mecanismo de sujeción es el diseño de la geometría encargada de hacer contacto con el objeto a manipular. Esta pieza debe acoplarse al eslabón b del mecanismo (según la nomenclatura de la sección anterior) en donde se aprovecha el comportamiento del ángulo θ_3 a lo largo de la trayectoria efectiva para que los puntos de la pinza generen el mismo desplazamiento que el punto B . Se estableció el ángulo de la cara plana de la pinza (la que debe hacer contacto con los objetos) de tal forma que se encuentra paralela a la cara plana de la pinza del otro dedo, además se generó una curvatura en la parte central de esta misma cara para evitar que geometrías redondas se deslicen fuera de los dedos del gripper. El diseño de estas piezas se muestra en la Figura 26.

El ensamblaje del mecanismo de sujeción se muestra en la Figura 27, cabe mencionar que se utilizan 2 piezas eslabón de entrada (Figura 26a) que representan al eslabón a del mecanismo, 4 piezas eslabón de soporte (Figura 26b) que cumple la función del eslabón c , 2 piezas pinza (Figura 26c) que representan al eslabón b y 1 pieza de bancada (Figura 26d) que cumple la función del eslabón d .

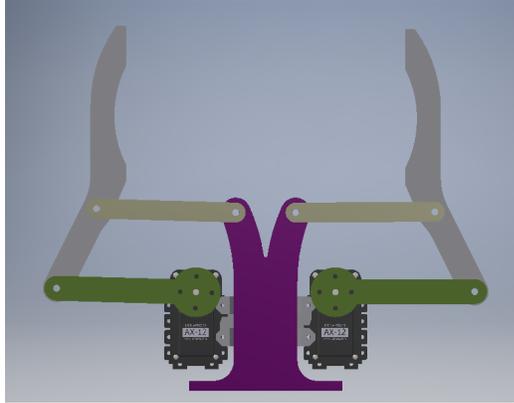


Figura 27: Ensamble de la pinza.

Con este diseño, y tomando en cuenta que el torque máximo ejercido por los motores es de 1.5Nm, se puede establecer que el gripper puede ejercer una fuerza máxima de 8.33N aproximadamente.

8.1.3. Desempeño mecánico del gripper

Todas las piezas fueron impresas utilizando filamento **PLA**. El mecanismo de sujeción real se puede observar en la Figura 28. Como era de esperarse, las piezas encajan sin mayor problema.

Se verificó el movimiento real generado por el gripper con el fin de validar el funcionamiento del mecanismo. Para esto se utilizó el software Tracker, en donde se analizó una grabación del gripper abriendo y cerrando los dedos tomando como referencia las juntas del mecanismo, en este caso, los tornillos. Se obtuvieron las posiciones del punto B (según nomenclatura de Figura 15), ángulos θ_2 y θ_3 con el fin de comparar los resultados experimentales con los teóricos presentados anteriormente (Figuras 24, 23 y 25). Cabe mencionar que se tomaron datos experimentales tanto del movimiento de apertura como del movimiento de cierre. En la Figura 29 se muestra la trayectoria real que presentó el gripper en comparación

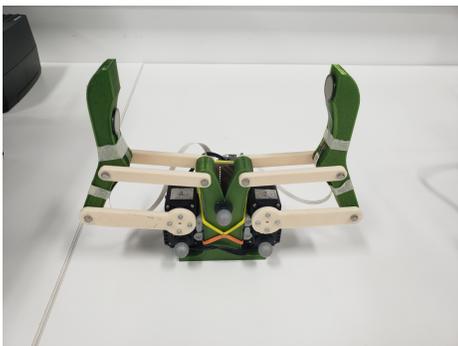


Figura 28: Gripper ensamblado con las piezas impresas en 3D.

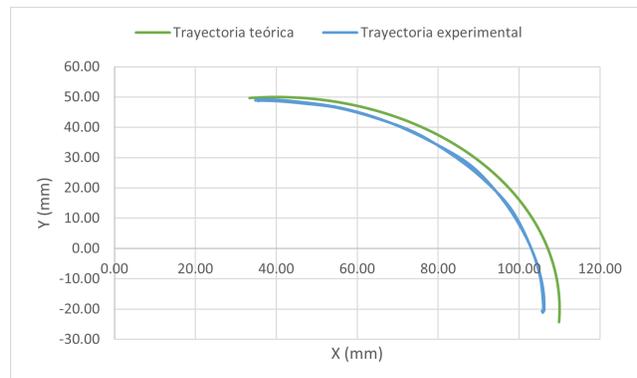
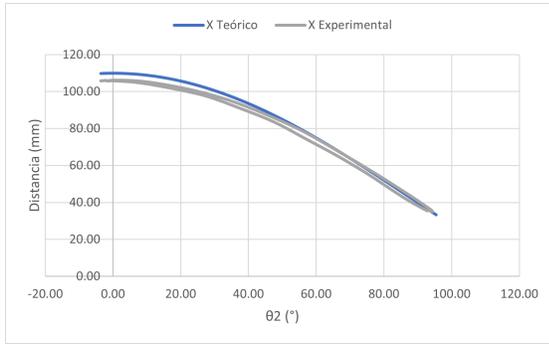
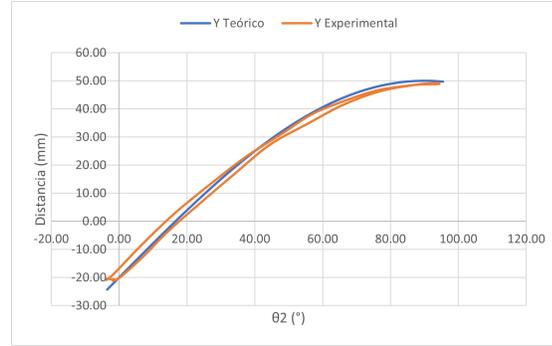


Figura 29: Comparación de trayectoria experimental y teórica del punto B .



(a) Comparación de coordenadas X .



(b) Comparación de coordenadas Y .

Figura 30: Comparación de coordenadas teóricas y experimentales del punto B en función de θ_2 .

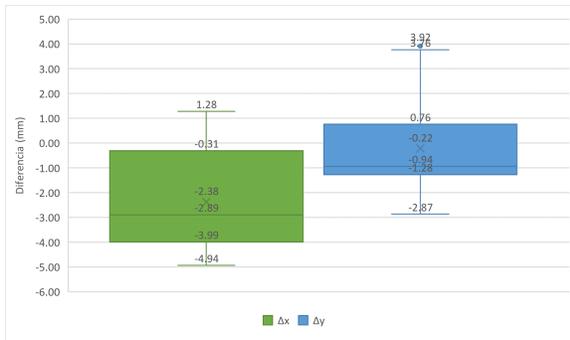


Figura 31: Diagrama de caja y bigote de la diferencia entre coordenadas teóricas y experimentales.

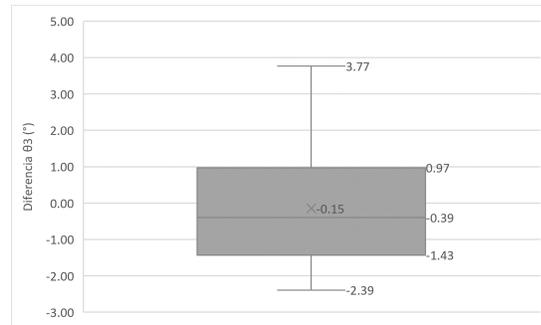


Figura 32: Diagrama de caja y bigote de la diferencia entre ángulo θ_3 teórico y experimental.

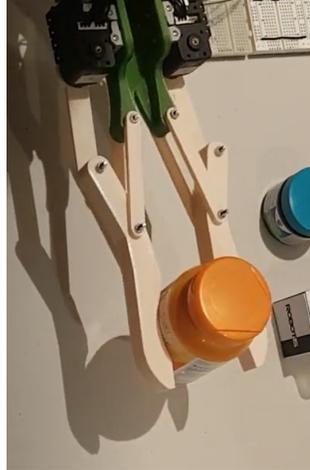
con la trayectoria esperada del mismo. Se puede apreciar que se tiene una diferencia entre las trayectorias, sin embargo, se comporta de la manera esperada. Además se graficaron los puntos X y Y por separado en la Figura 30, de igual manera se pueden apreciar diferencias pero en general se comporta de la manera establecida.

Las diferencias obtenidas entre las coordenadas se resumen en la Figura 31 en donde se graficaron por medio de un diagrama de caja y bigote. Es evidente notar que si bien las diferencias existen no son mayores a 5mm y la mayoría de las diferencias se mantiene entre 0mm y 4mm de diferencia. En cambio, en la Figura 32 se muestra la diferencia entre el ángulo medido y el ángulo teórico de θ_3 . A partir de la gráfica es posible deducir que el ángulo medido se mantiene alrededor del establecido, no se presenta una diferencia mayor a los 4° y oscila alrededor de 0° . Si bien el comportamiento real del gripper puede diferir del comportamiento deseado, es muy probable que estas discrepancias sean reflejo de una medición de otro punto cercano al punto exacto deseado, ya que, dentro del software Tracker se tomó como referencia la cabeza del tornillo el cual tiene un diámetro aproximado de 5mm .

Por otra parte, se sometió al gripper a una prueba de sujeción de objetos de distintas geometrías y dimensiones. Durante el experimento se probó sujetar objetos con geometrías rectangulares, cilíndricas y esféricas, además el ancho de estos objetos varió entre 1.2cm y



(a) Gripper sujetando exitosamente una caja.



(b) Gripper sujetando exitosamente un objeto cilíndrico.



(c) Gripper sujetando exitosamente un objeto esférico.

Figura 33: Gripper sujetando objetos de diferentes geometrías.

6.5cm. Durante el experimento se implementó una rutina de movimiento que establecía que los motores se posicionaran entre 0° y 90° . Cabe mencionar que no se probó sujetar objetos de mayores dimensiones debido a la rutina de control que se utilizó, no se quería someter a los motores a mucha resistencia antes de llegar al ángulo deseado. En la Figura 33 se muestra al gripper sujetando algunos objetos con los que se probó, adicionalmente en la sección de anexos se adjunta un enlace en donde se encuentra la grabación completa del experimento. El gripper demostró ser capaz de sujetar objetos de diferentes geometrías, sin embargo, no fue capaz de sujetar todos los objetos, en especial los objetos de diámetros menores a 4cm y los objetos no redondos con anchos menores a 3.5cm. Este problema de sujeción puede ser causa del tipo de rutina implementada ya que al establecer una posición final fija, los motores pueden disminuir el torque ejercido en los últimos centímetros de apertura y al añadirle el factor de distancia desde el eje de los motores hasta la punta de la pinza la fuerza ejercida en ese punto puede disminuir de una forma más elevada.

8.2. Diseño electrónico

Como parte del diseño electrónico se encuentran los siguientes puntos:

- Diseño de circuito electrónico.
- Diseño de PCB.

8.2.1. Circuito electrónico

El circuito electrónico tuvo dos funciones esenciales dentro del funcionamiento del gripper, las cuales eran: adaptar el voltaje de entrada para alimentar a todos los componentes electrónicos que conforman el gripper y adaptar la señal proveniente del ESP32 a los motores AX12-A y viceversa.

Criterio	Peso	Fuente AC-DC	Nota	Batería	Nota
Espacio que ocupa dentro del gripper	40 %	Solo requiere de un adaptador a PCB	4	Generalmente las baterías son grandes	2
Facilidad de uso	10 %	Solo se debe conectar a un tomacorriente	5	Se debe cambiar la batería cuando se acabe	4
Limitante de movimiento	25 %	Siempre tiene que estar conectado, habrá un cable	1	Los cables se mantienen cercanos al gripper	5
Capacidad de entrega de potencia	25 %	Constante siempre y cuando esté conectado	5	Tiene un límite, la batería se acaba	3
Puntuación	100 %	3.6		3.2	

Cuadro 10: Trade study sobre fuente de potencia (notas sobre 5).

La mayoría de componentes del gripper trabajan a 3.3V, sin embargo, los motores operaban a un voltaje mayor como se puede observar en el Cuadro 3. El fabricante recomienda que los motores operen a 11.1V pero se decidió alimentar los motores con 12V, debido a que es el voltaje más cercano a 11.1V que entregan las fuentes de voltaje disponibles en el mercado. Ya que el voltaje de entrada fue de 12V, fue necesario emplear un regulador de voltaje para poder alimentar el resto de componentes sin necesidad de una segunda fuente de alimentación. Se realizó un trade study, mostrado en el Cuadro 10, para comparar las ventajas y desventajas que trae para esta aplicación el uso de baterías o fuentes AC-DC como entrada de potencia.

Posteriormente se elaboró otro trade study, mostrado en el Cuadro 11, para facilitar la decisión sobre el tipo de regulador a implementar.

Criterio	Peso	Regulador integrado (lineal)	Nota	Regulador tipo Buck (conmutado)	Nota
Tamaño	40 %	El integrado ocupa un espacio razonable y no requiere componentes adicionales	4	El integrado es pequeño pero generalmente requiere un disipador de calor de mayor tamaño	3
Eficiencia de conversión	10 %	Presenta alta eficiencia durante la conversión	5	Pierde energía en forma de calor	3
Calor generado	10 %	No genera cantidades considerables de calor	5	Puede llegar a calentarse bastante	2
Disponibilidad	40 %	Se encuentran pero los modelos son limitados	4	Se encuentran una gran cantidad de modelos	5
Puntuación	100 %	4.2		3.7	

Cuadro 11: Trade study sobre tipo de regulador de voltaje (notas sobre 5).

El circuito de alimentación se muestra en la Figura 34, en donde un terminal block ejemplifica el adaptador de la fuente al PCB como entrada de voltaje. Además, se incluye el regulador de voltaje que genera los 3.3V junto con un LED para señalar que el gripper está energizado. Por último se muestra un header cuya función es dejar la opción de colocarle al gripper un switch de encendido/apagado.

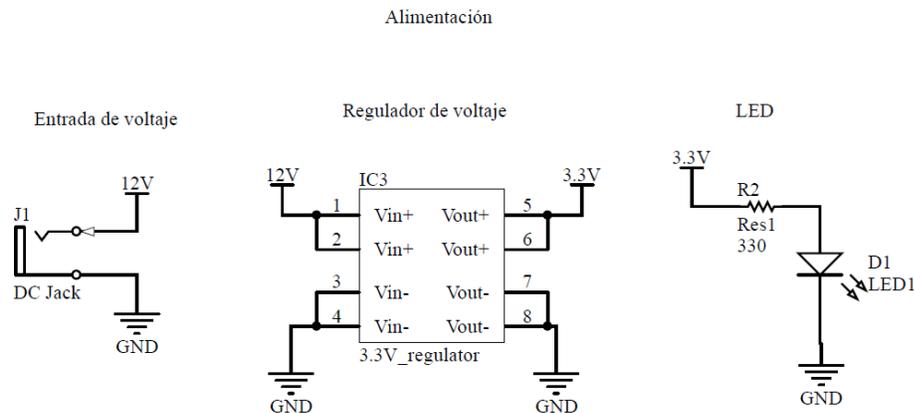


Figura 34: Esquemático de fuente de alimentación.

Por otra parte, en la Figura 35, se muestran los pines del ESP32 que se utilizaron y se da referencia a sus conexiones dentro del circuito. La Figura 36 muestra el diagrama de conexiones del multiplexor CD4053BE, del cual se utilizaron 2 canales (el a y b) en donde el **Enable** es el mismo para ambos. De esta forma es posible asegurar que el bus de

datos se encuentre conectado con solo un pin del **UART**; a la vez, lo cual permite establecer comunicación UART half dúplex. Es importante mencionar que la razón por la cual se utilizó el multiplexor CD4053BE fue su disponibilidad y su característica de tener canales bidireccionales.

Es importante recalcar que al habilitar el enable ($enable = 1$) el bus de datos se conecta al pin TX y el pin RX se conecta a la resistencia en modo *pullup*, y al deshabilitar el enable ($enable = 0$) el bus de datos se conecta al pin RX y el pin TX a la resistencia *pullup*.

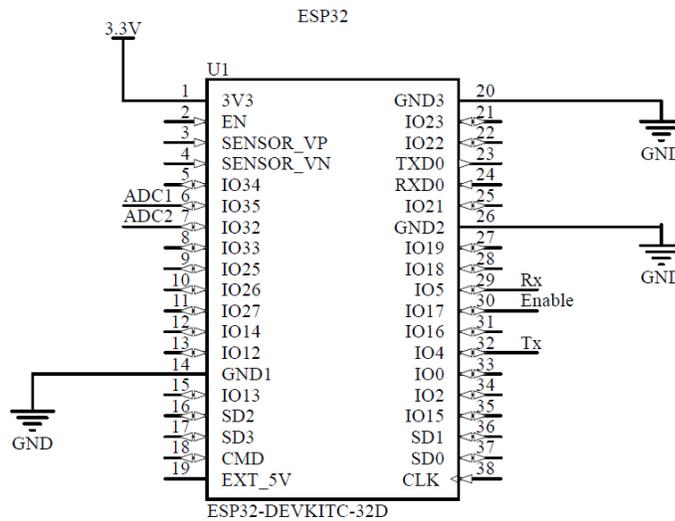


Figura 35: Esquemático del ESP32.

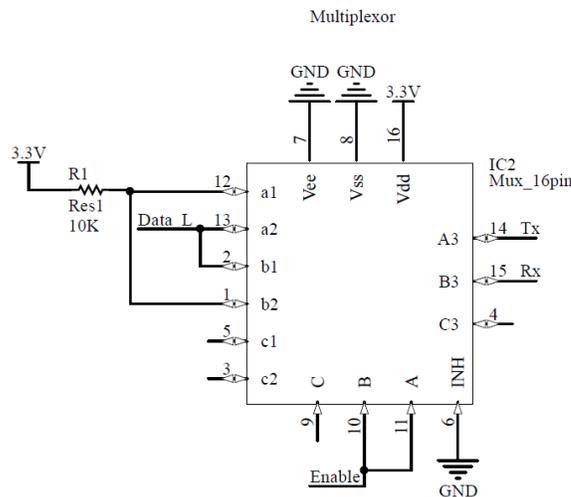


Figura 36: Esquemático del multiplexor.

En la Figura **37** se muestra la conexión del convertor bidireccional, del cual se utiliza un solo canal, por el cual se lleva a cabo la comunicación UART half dúplex.

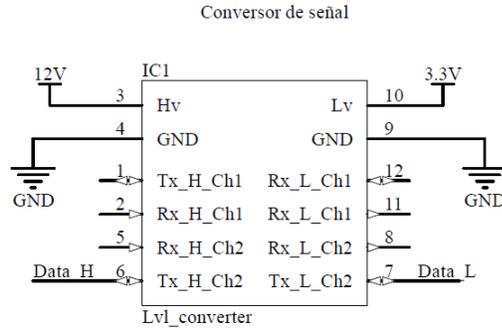


Figura 37: Esquemático del convertor de nivel bidireccional.

Por último, en la Figura 38 se muestran tanto los pines de comunicación hacia los motores como los pines de conexión del sensor de fuerza. Los pines de comunicación se establecieron en base al Cuadro 4.

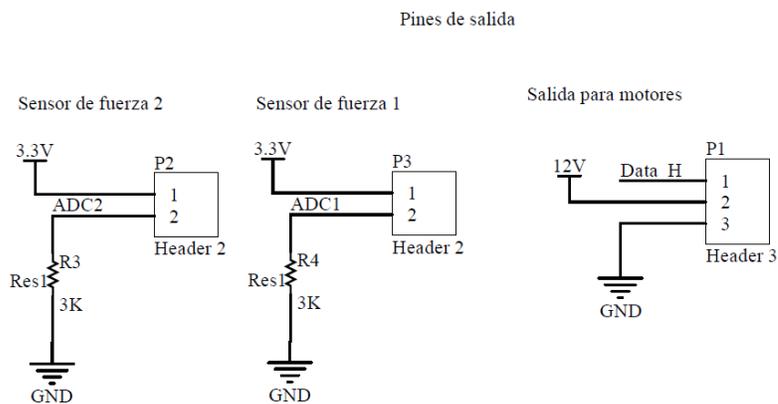


Figura 38: Esquemático de pines de entradas y salidas.

Se verificó el comportamiento del convertidor bidireccional al estar sometido a un voltaje alto de 10 y 12V y un voltaje bajo de 3.3V, ya que esos serán los voltajes de operación. Primero se utilizó una señal cuadrada de 2kHz 0-10V (no se utilizaron 12V porque el límite del generador de funciones era 10V) como entrada en el nodo $Data_H$ (según Figura 37) y se midió la salida en el nodo $Data_L$. Adicionalmente se probó el comportamiento del módulo al estar sometido a una señal cuadrada de 2kHz 0-3.3V como entrada en el nodo $Data_L$ y se midió la salida en el nodo $Data_H$. Las gráficas obtenidas se muestran en las Figuras 39 y 40 respectivamente, en donde la gráfica de color amarillo representa al nodo $Data_L$, y la gráfica de color azul representa al nodo $Data_H$. Como puede apreciarse en las figuras, el convertor no presentó problemas en seguir la señal de entrada y subirle o bajarle el voltaje (según la dirección de la señal).



Figura 39: Salida $Data_L$ con señal de entrada en nodo $Data_H$.

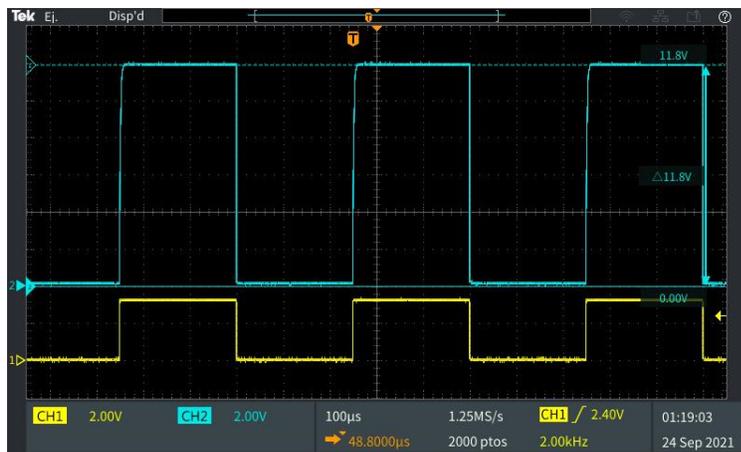


Figura 40: Salida $Data_H$ con señal de entrada en nodo $Data_L$.

Por otra parte, se probó el desempeño del multiplexor en conjunto con el convertor de voltaje, se conectaron los pines de los nodos $Data_L$ mostrados en las Figuras 36 y 37, y se manipularon los nodos $Data_H$, TX y RX y $Enable$. Para esto se utilizó una señal cuadrada de 2kHz 0-10V como entrada en el nodo $Data_H$, y se midieron los nodos TX y RX al cambiar el estado del nodo $Enable$. En la Figura 41 se muestra la gráfica de los nodos TX (color azul) y RX (color amarillo) al conectar el nodo $enable$ a tierra (0V). Es evidente que el nodo TX se mantiene constante a 3.3V mientras el nodo RX sigue la señal de entrada. Por otro lado, en la Figura 42 se muestra, de igual manera, la gráfica de los nodos TX (color azul) y RX (color amarillo) con el nodo $enable$ a voltaje (3.3V). Como era de esperarse, ahora sucede lo contrario, el nodo TX sigue la señal de entrada, mientras el nodo RX se mantiene constante a 3.3V. Por lo que se confirma la capacidad del circuito para permitir establecer una comunicación UART half dúplex.

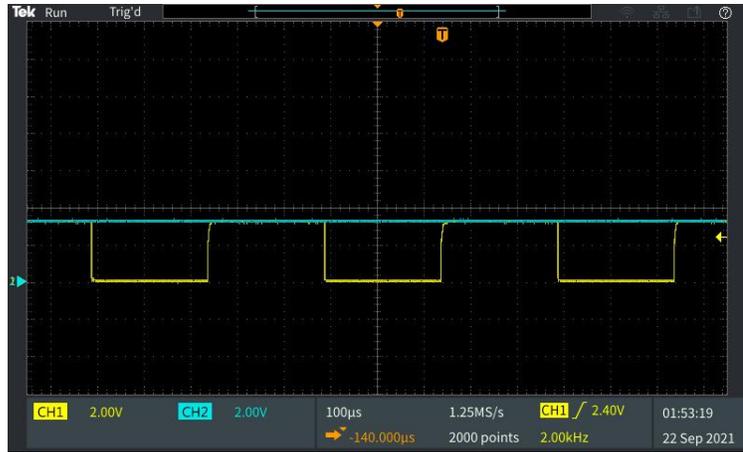


Figura 41: Salida de los 2 canales del multiplexor con $enable = 0$.

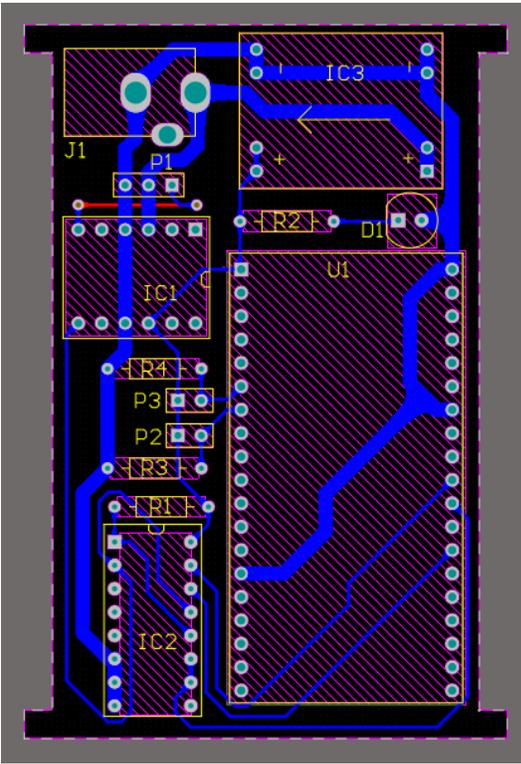


Figura 42: Salida de los 2 canales del multiplexor con $enable = 1$.

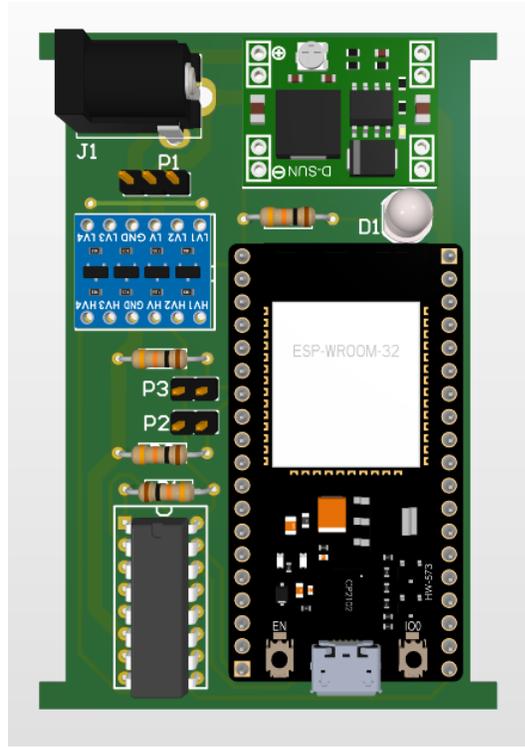
8.2.2. PCB

La placa o PCB diseñada en Altium, basada en el esquemático mostrado con anterioridad (y adjunto en el link a github encontrado en los anexos), se ilustra en la Figura 43.

Por otra parte, el PCB manufacturado con los componentes provisionales se muestran en la Figura 44.



(a) Vista 2D.



(b) Vista 3D.

Figura 43: Diseño preliminar de PCB.

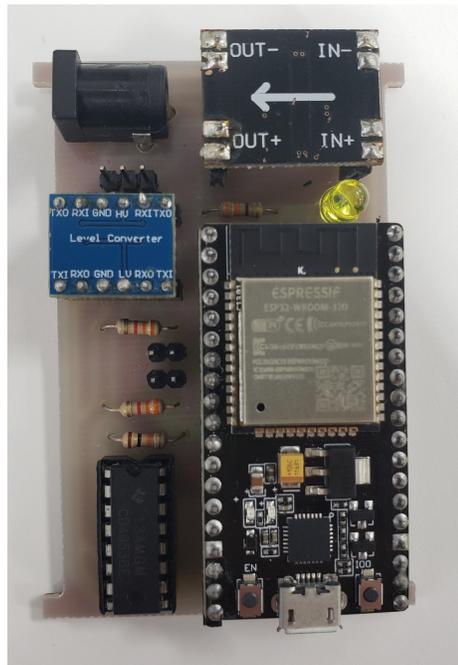


Figura 44: PCB de gripper con componentes provisionales.

9.1. Rutinas de movimiento del gripper

Como parte del firmware del gripper se desarrolló una librería para facilitar el uso de los motores Dynamixel AX12-A. Dentro de la librería se establecieron las funciones detalladas en el Cuadro 12. Con esta librería se establecieron las rutinas de control del gripper en donde se limitaron los movimientos de los servos y se sincronizaron para generar el comportamiento deseado del gripper.

Función	Parámetros	Descripción
<i>init_UART2</i>	No tiene	Configura e inicializa el módulo UART2 del ESP32.
<i>TxByte</i>	Entero sin signo de 8 bits que se desea enviar	Envía el byte de 8 bits por medio del módulo UART2
<i>Init_GPIO</i>	No tiene	Configura e inicializa el pin utilizado para controlar el multiplexor.
<i>Set_LED</i>	Dos enteros sin signo de 8 bits, el primero especifica el ID del servo y el segundo el estado del LED.	Establece el estado del Led de un servo específico.
<i>Set_pos</i>	Entero sin signo de 8 bits que establece el ID del servo y un entero sin signo de 16 bits que se desea enviar (permite valores entre 0 y 1023)	Establece la posición de un servo específico.

Cuadro 12: Funciones de la librería para el control de los motores Dynamixel AX12-A.

9.2. Control de fuerza

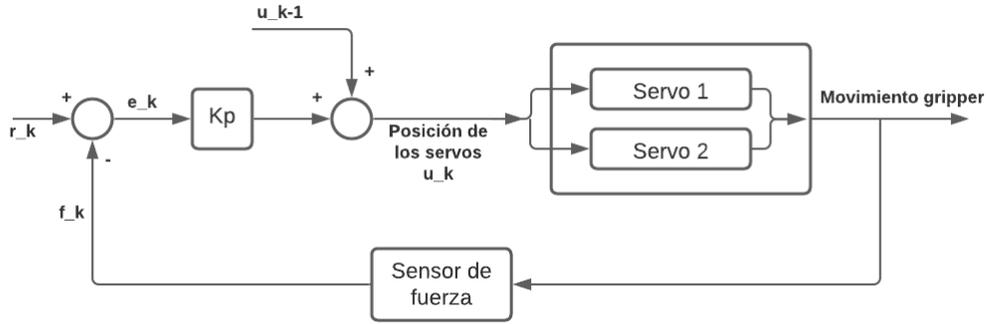


Figura 45: Control implementado en el gripper.

El diagrama de bloques del control implementado es el mostrado en la Figura 45. Este es un control proporcional con un término de feedforward, en donde r_k es el valor de referencia de fuerza que se quiere que el gripper aplique, f_k se refiere al k -ésimo valor de fuerza leído por el sensor de fuerza, e_k es el error en la k -ésima iteración, u_k se refiere a el valor actual de la salida de control el cual es la posición deseada de los servos, y u_{k-1} es la salida de control previa o posición actual de los servos. Es importante mencionar que este tipo de control funciona gracias a que la planta está compuesta por dos servos, los cuales en sí ya implementan un control debido a que se le envía un valor de referencia y estos son capaz de llegar a la misma.

El diagrama de bloques mostrado en la Figura 45 se puede describir de la siguiente forma:

$$u_k = u_{k-1} + \bar{K}_p \cdot (r_k - f_k)$$

De la cual se puede derivar lo siguiente:

$$\begin{aligned} u_k &= u_{k-1} + \bar{K}_p \cdot e_k \\ u_k - u_{k-1} &= \bar{K}_p \cdot e_k \\ u_k - u_{k-1} &= K_p \cdot e_k \cdot \Delta t \\ \frac{u_k - u_{k-1}}{\Delta t} &= K_p \cdot e_k \end{aligned}$$

Lo cual es la manera discreta de escribir:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= K_p \cdot e \\ \dot{u} &= K_p \cdot e \end{aligned}$$

Lo cual se refiere a un control proporcional de velocidad angular de los servomotores que puede representarse mediante el diagrama de bloques de la Figura 46. Cabe mencionar que

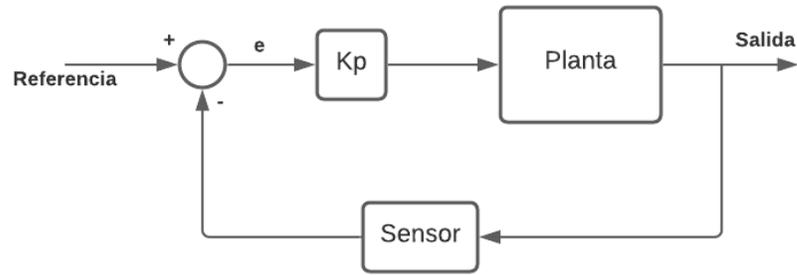
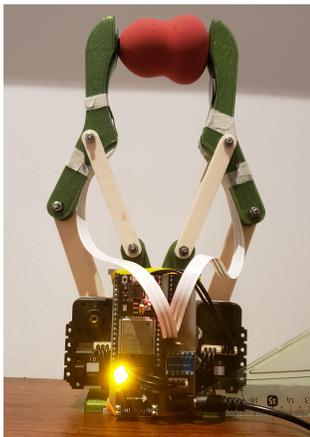


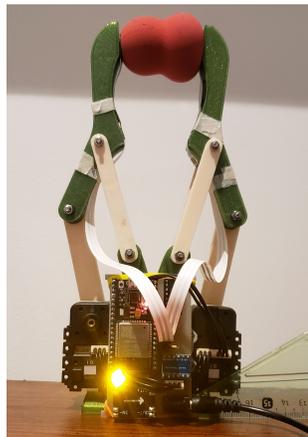
Figura 46: Diagrama de bloques control proporcional convencional.

se implementó de esta forma ya que los servos no permiten que se controle su velocidad, sino que únicamente su posición.

Para este caso, se decidió sacrificar el error en estado estacionario con el fin de evitar el overshoot, lo cual es perjudicial para esta aplicación. El control se detiene cuando se llega a un error ubicado dentro de una tolerancia y no al llegar a cero, ya que si se presenta overshoot, se corre el riesgo de que el gripper llegue a deformar o aplastar el objeto que se desea manipular. La tolerancia de error en estado estacionario es de 0.5N. Se verificó el comportamiento del control implementado sujetando un objeto elástico tomando como referencia distintos valores de fuerza, el funcionamiento se puede apreciar en la Figura 47. Por otra parte, se registró el error obtenido al establecer distintos valores de referencia de fuerza y los resultados se muestran en el Cuadro 13.



(a) Control de fuerza con referencia de 0.5N.



(b) Control de fuerza con referencia de 2.0N.



(c) Control de fuerza con referencia de 4.0N.

Figura 47: Gripper aplicando diferente fuerza sobre el mismo objeto.

Fuerza de referencia	Error estacionario
0.5N	$e_k < 0.5$
1.0N	$e_k < 0.5$
1.5N	$e_k < 0.5$
2.0N	$e_k < 0.5$
2.5N	$e_k < 0.5$
3.0N	$e_k < 0.5$
3.5N	$e_k < 0.5$
4.0N	$e_k < 0.5$
4.5N	$e_k < 0.5$
5.0N	$0.4 < e_k < 0.8$
5.5N	$1.2 < e_k < 1.4$

Cuadro 13: Cuadro de error estacionario con diferente fuerza referencia.

Considerando lo expuesto en el cuadro anterior, podemos inferir que el límite real de fuerza de aplicación del gripper es de 5.0N aproximadamente, lo cual difiere del límite teórico de 8.33N. Esta diferencia puede ser causa de los componentes provisionales que se utilizaron, ya que se usó una fuente de 2A y no una de 3A como estaba pensado, esto afecta directamente a los servomotores ya que en su hoja de datos está establecido que estos pueden generar 1.5Nm de torque al estar alimentados con 1.5A cada uno.

9.3. Comunicación inalámbrica

Como primer punto se definió el tipo de comunicación inalámbrica que el gripper utiliza, para esto se tomó en cuenta lo establecido en el trade study del Cuadro 14. Cabe mencionar que gracias al módulo del R17 realizado por el estudiante Jose Pellecer 27, no hace mucho sentido hacer que el gripper sea un agente extra dentro del ecosistema Robotat sino que este sea una extensión del agente del R17, por lo cual la comunicación bluetooth entre el módulo y el gripper es la mejor opción. El módulo del R17 facilita en gran parte la comunicación que el gripper debe ejercer con dispositivos externos, de esta forma hace más sentido que el gripper sea completamente controlado por el módulo del R17, lo cual le estaría dando acceso al ecosistema Robotat sin ser un agente extra que pueda afectar la velocidad de comunicación. Esto hace que no sea necesario que el gripper interprete comandos de Roboforth II en sí, sino que el mismo módulo del R17 es encargado de enviar tanto los comandos de Roboforth II para el robot R17 como los comandos de control del gripper.

Como parte del firmware del gripper se desarrolló una librería para facilitar la configuración del módulo bluetooth del ESP32 y envío de información vía bluetooth, las funciones desarrolladas en la librería se pueden apreciar en el Cuadro 15. Cabe mencionar que esta librería se basó en ejemplos publicados por Espressif Systems (encontrados en 28 29). La forma en que se envían los datos vía bluetooth es por medio de paquetes, en donde se establecieron dos tipos, uno de la forma GX y otro de la forma FXX.X. Estos indican un cambio en estado del gripper y un cambio en la referencia de fuerza respectivamente, en donde la letra X indica el valor de fuerza con una decena, una unidad y un decimal o bien

criterio	Peso	Wifi MQTT	Nota	Bluetooth	Nota
Complejidad	20 %	Ya está establecido el protocolo de comunicación, únicamente se debe implementar.	3	Se debe empezar desde cero.	1
Velocidad de transmisión	25 %	Puede afectar si hay bastantes agentes dentro del ecosistema Robotat.	3	No se espera que afecte a la aplicación.	5
Facilidad de uso	25 %	Se necesita establecer la configuración.	4	Se necesita establecer la configuración.	4
Obstrucción con otros sistemas	30 %	Se debe registrar como un agente extra dentro del ecosistema Robotat.	3	No obstruye otros sistemas.	5
Puntuación	100 %		3.25		3.95

Cuadro 14: Trade study sobre tipo de comunicación a implementar.

1 o 0 según se requiera que el gripper cierre o abra respectivamente.

Para probar la robustez de la comunicación se establecieron dos pruebas, en la primera se probó la velocidad con la que se podían enviar los paquetes sin presentar pérdidas y en la segunda se probó la distancia a la cual los paquetes se pueden enviar sin presentar pérdidas. Para ambas pruebas se enviaron 400 paquetes a través del dispositivo master y se contaron cuantos llegaban al dispositivo slave. Los resultados se muestran en las Figuras 48 y 49.

De estos resultados se puede decir que la comunicación bluetooth se comporta de manera satisfactoria y excede las expectativas, ya que para esta aplicación no es necesario enviar paquetes de manera tan seguida, los paquetes son necesarios enviarlos cada vez que el R17

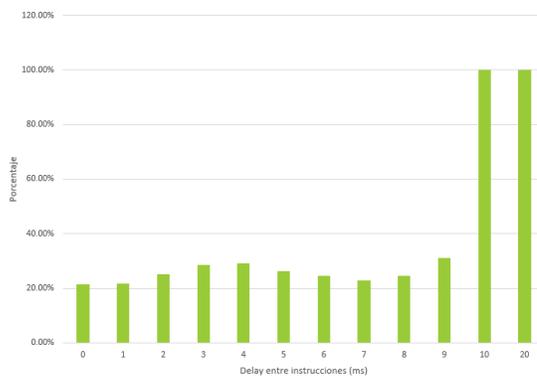


Figura 48: Porcentaje de paquetes recibidos en función del delay entre instrucciones de envío.

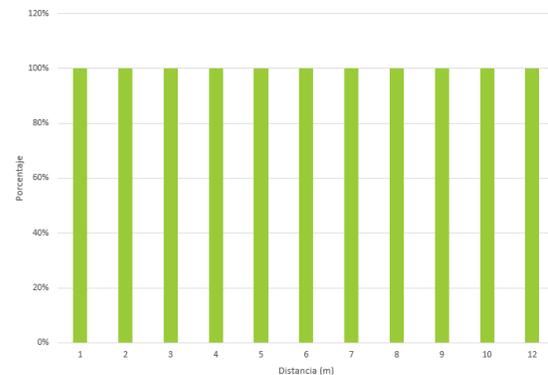


Figura 49: Porcentaje de paquetes recibidos en función de la distancia entre dispositivos ESP32.

Función	Parámetros	Descripción
<i>config_bt_slave</i>	No tiene	Configura e inicializa la comunicación bluetooth del dispositivo actuando como <i>slave</i> , en este caso el gripper.
<i>config_bt_master</i>	No tiene	Configura e inicializa la comunicación bluetooth del dispositivo actuando como <i>master</i> , en este caso el módulo del R17.
<i>set_gripper_state</i>	Entero sin signo de 8 bits, que indica el estado del gripper, abierto (0) o cerrado (1).	Únicamente para el dispositivo configurado como <i>master</i> , envía el estado deseado del gripper vía bluetooth.
<i>set_gripper_force</i>	Punto flotante del valor de referencia de fuerza que se desea enviar.	Únicamente para el dispositivo configurado como <i>master</i> , envía el valor de referencia de fuerza deseado del gripper vía bluetooth.
<i>get_gripper_state</i>	No tiene	Regresa el estado del gripper recibido vía bluetooth, únicamente para el dispositivo configurado como <i>slave</i> .
<i>get_gripper_force</i>	No tiene	Regresa el valor de referencia de fuerza recibido vía bluetooth, únicamente para el dispositivo configurado como <i>slave</i> .

Cuadro 15: Funciones de la librería para la comunicación bluetooth.

termina su rutina lo cual toma cierta cantidad de segundos. Por otra parte, la distancia de transmisión de paquetes es bastante mayor a la distancia a la que se encontrarán el módulo del R17 del gripper.

Por último, se probó qué tan detectable es el gripper al sistema de captura de movimiento. Se establecieron tres rutinas con el robot R17, en donde la primera rutina permitió que el sistema de captura de movimiento detectara al gripper un 99.86 % del tiempo, con la segunda rutina se obtuvo un porcentaje de detección de 97.42 % y en la última rutina se obtuvo un porcentaje de detección 76.84 %. La última rutina involucraba un giro de 360° del gripper, por lo que es comprensible que el sistema de captura de movimiento lo haya perdido, ya que en algún punto los marcadores colocados en el gripper se encontraban apuntando hacia afuera de la plataforma, por lo que pocas cámaras (o ninguna) del sistema de captura de movimiento podía detectar los marcadores.

- Se diseñó y manufacturó un gripper que permite controlar la fuerza que ejerce sobre los objetos.
- Se diseñó y manufacturó un gripper cuyo mecanismo presenta un cierre paralelo.
- Se diseñó y manufacturó un gripper cuya pose es detectable por el sistema de captura de movimiento Optitrack.
- Se diseñó e implementó un sistema electrónico de distribución de potencia y control que permite la actuación del gripper.
- El gripper es capaz de ser controlado mediante comunicación bluetooth que ejecuta el módulo encargado de enviar comandos de Roboforth II al R17.
- Se determinó que el gripper puede llegar a operar con una fuerza de referencia máxima de 5N.

1. Se recomienda mantener la orientación del gripper de tal manera que los marcadores siempre apunten hacia adentro de la plataforma.
2. Se recomienda colocar cámaras adicionales del sistema de captura de movimiento para suprimir puntos ciegos o probar diferentes distribuciones para no limitar tanto el movimiento del gripper y robot R17.
3. Se recomienda validar la fuerza que el gripper ejerce de manera cuantitativa para verificar la fuerza real aplicada.
4. Se recomienda colocar un mecanismo en la punta de los dedos del gripper para asegurar que el objeto siempre aplica la fuerza sobre el sensor.
5. Se recomienda establecer la carga máxima que puede soportar el gripper, esto puede evitar problemas de mal funcionamiento en futuras aplicaciones.

-
- [1] Y. Kim, H. Song y C. Maeng, «BLT Gripper: An Adaptive Gripper With Active Transition Capability Between Precise Pinch and Compliant Grasp,» *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, n.º 4, págs. 5518-5525, 2020. DOI: [10.1109/LRA.2020.3008137](https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3008137).
- [2] C.-H. Liu, T.-L. Chen, C.-H. Chiu, M.-C. Hsu, Y. Chen, T.-Y. Pai, W.-G. Peng e Y.-P. Chiang, «Optimal design of a soft robotic gripper for grasping unknown objects,» *Soft robotics*, vol. 5, n.º 4, págs. 452-465, 2018.
- [3] I. Martínez, E. Aristondo, D. Castellanos, E. Chang y E. Zea, «MEGAPROYECTO GC-R17: "Sistema háptico de control a distancia",» Universidad del Valle de Guatemala, 2009.
- [4] J. A. Castañeda, «Diseño e implementación de una red de comunicación wifi e interfaz gráfica para una mesa de pruebas de robótica de enjambre,» Universidad del Valle de Guatemala, 2020.
- [5] S. Bouchard, *Robot End Effector: Definition and Examples*, feb. de 2014. dirección: <https://blog.robotiq.com/bid/53266/Robot-End-Effector-Definition-and-Examples>.
- [6] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann y H. Schunk, *Robot grippers*. John Wiley & Sons, 2007.
- [7] Omega, *Introducción a Las Pinzas (Grippers)*, sep. de 2018. dirección: <https://cl.omega.com/prodinfo/pinzas-grippers.html>.
- [8] O. J. Jorg, M. Sportelli, M. Fontanelli, C. Frasconi, M. Raffaelli y G. Fantoni, «Design, Development and Testing of Feeding Grippers for Vegetable Plug Transplanters,» *AgriEngineering*, vol. 3, n.º 3, págs. 669-680, 2021, ISSN: 2624-7402. DOI: [10.3390/agriengineering3030043](https://doi.org/10.3390/agriengineering3030043). dirección: <https://www.mdpi.com/2624-7402/3/3/43>.
- [9] U. Robots, *Hakko Soldering*, 2020. dirección: <https://www.universal-robots.com/plus/products/hakko/hakko-soldering/>.

- [10] D. Group, *EcoBell – Rotary atomizers*, 2021. dirección: <https://www.durr.com/en/products/paint-shop-application-technology/paint-application/ecobell-rotary-atomizer>.
- [11] R. L. Norton, *Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*, Quinta, J. E. Murrieta, ed. McGraw-Hill, Interamericana, 2013.
- [12] M. Zea, *Retroalimentación negativa*, en IE3006: Sistemas de Control 1 (lección 7). Universidad del Valle de Guatemala, 2020.
- [13] *R17 Robot Manual*, ST Robotics, sep. de 2008.
- [14] D. N. Sands, *Roboforth II*, mayo de 2015. dirección: <https://www.strobotics.com/manuals/manual15.htm#1.1>.
- [15] Robotis, *Robotis e-Manual AX-12A*, 2021. dirección: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/ax/ax-12a/>.
- [16] —, *Dynamixel Protocol 1.0*, 2021. dirección: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/protocol1/>.
- [17] R. Teja, *Introduction to ESP32: Specifications, ESP32 DevKit Board, Layout*, feb. de 2021. dirección: https://www.electronicshub.org/getting-started-with-esp32/#ESP32_DevKit_-_The_ESP32_Development_Board.
- [18] A. Menache, *Understanding motion capture for computer animation*. Elsevier, 2011.
- [19] OptiTrack, *Prime 41 - Specs*, 2021. dirección: <https://optitrack.com/cameras/primex-41/specs.html>.
- [20] Geogebra, *Geogebra*, 2021. dirección: <https://www.geogebra.org/>.
- [21] Autodesk, *Inventor*, 2021. dirección: https://latinoamerica.autodesk.com/products/inventor/overview?us_oa=dotcom-us&us_si=64a3d950-76c0-48eb-9b25-9085a14b0779&us_st=inventor&us_pt=INVNTOR.
- [22] Ultimaker, *Ultimaker Cura*, 2020. dirección: <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura>.
- [23] R. M. H. Douglas Brown Wolfgang Christian, *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*, 2021. dirección: <https://physlets.org/tracker/>.
- [24] Altium, *Altium Designer*, 2021. dirección: <https://www.altium.com/altium-designer/es>.
- [25] Microsoft, *Visual Studio Code*, 2021. dirección: <https://code.visualstudio.com/>.
- [26] Robotis, *Robotis e-Manual OpenCM 9.04*, 2021. dirección: <https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/controller/opencm904/>.
- [27] J. Pellecer, «Diseño e implementación de un paquete de herramientas de software para controlar inalámbricamente un manipulador serial R17 dentro de un ecosistema basado en captura de movimiento,» Universidad del Valle de Guatemala, 2021.
- [28] Espressif, *ESP-IDF BT-SPP-VFS-INITIATOR demo*, 2021. dirección: https://github.com/espressif/esp-idf/tree/caa9e323cc9556855e122cabe289d61b49aaa479/examples/bluetooth/bluedroid/classic_bt/bt_spp_vfs_initiator.
- [29] —, *ESP-IDF BT-SPP-ACCEPTOR demo*, 2021. dirección: https://github.com/espressif/esp-idf/tree/master/examples/bluetooth/bluedroid/classic_bt/bt_spp_acceptor.

La simulación del movimiento generado por el mecanismo en función del ángulo de entrada se puede apreciar en el siguiente enlace: <https://www.geogebra.org/m/x3ffawva>.

La documentación del proyecto se puede encontrar en el siguiente enlace de Github: <https://github.com/mezea-uvg/robotat/tree/17232-Dev>.

En la siguiente figura se muestra una captura que demuestra cómo se obtuvieron los datos del movimiento del gripper a través de la grabación por medio de Tracker.

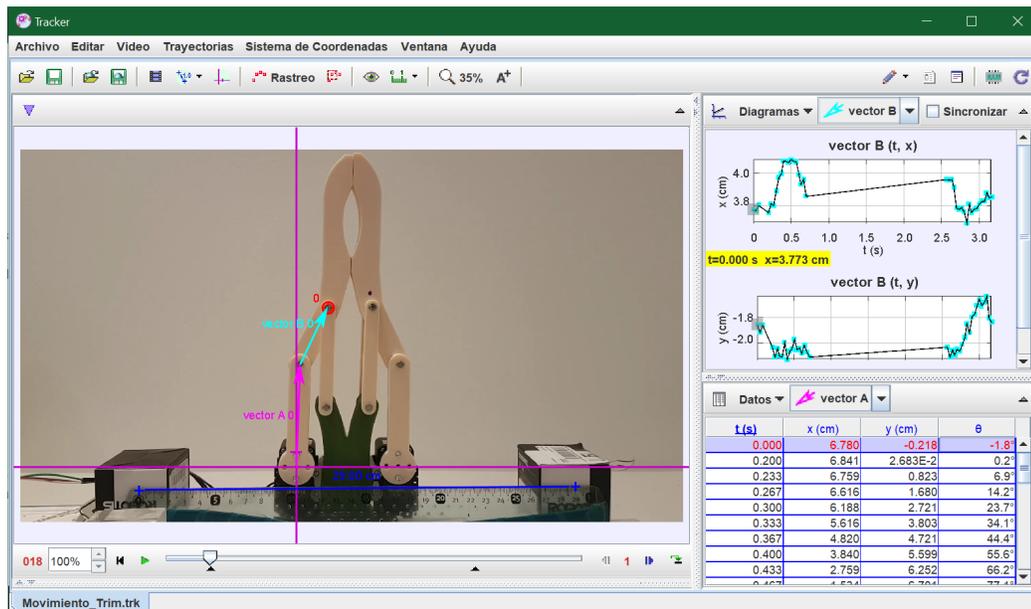


Figura 50: Captura de pantalla de toma de datos en Tracker.

La grabación del experimento en donde se prueba la capacidad de sujeción del gripper

con objetos distintos se puede observar en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/file/d/19y1BQ93up1KkLmUP6wboCyMk4RyDcFJE/view?usp=sharing>

En la siguiente figura se muestra el acople del gripper al R17 junto con los marcadores que se le colocaron al mismo.



(a) Imagen completa de robot R17.



(b) Acercamiento a gripper.

Figura 51: Acople del gripper al R17.

Los videos de la demostración final de los proyectos de graduación (incluyen los trabajos realizados por Jose Pellecer con el R17 y Camilo Perafán con el Opti Track) del año 2021 se pueden apreciar en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1m120NMbKsk2ef3nvsC565sKrbrj6amIP?usp=sharing>

CCW: En contra de las agujas del reloj, por sus siglas en inglés. [26](#)

CW: A favor de las agujas del reloj, por sus siglas en inglés. [26](#)

Enable: Describe una señal digital de control (1 o 0), generalmente se utiliza para habilitar o deshabilitar alguna función.. [45](#)

Feedforward: Describe a un término que se suma a la salida de control.. [35](#)

PCB: Placa de circuito eléctrico. [34](#)

PLA: Ácido poliláctico, por sus siglas en inglés. [41](#)

RF: Radio frecuencia. [29](#)

UART: Protocolo de comunicación serial, sus siglas significan: *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*. [46](#)