
Diseño de un *Gripper* no planar para un brazo robótico R17

Larry Paúl Fuentes



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño de un *Gripper* no planar para un brazo robótico R17

Trabajo de graduación presentado por Larry Paúl Fuentes para optar al
grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño de un *Gripper* no planar para un brazo robótico R17

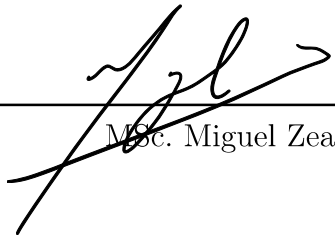
Trabajo de graduación presentado por Larry Paúl Fuentes para optar al
grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2023

Vo.Bo.:

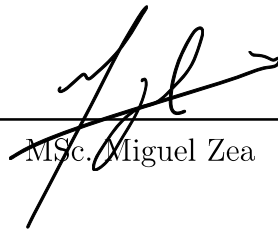
(f)



MSc. Miguel Zea

Tribunal Examinador:

(f)



MSc. Miguel Zea

(f)



Ing. Pablo Mazariegos

(f)



Ing. Kurt Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de enero de 2023.

La robótica es una herramienta que llevará al ser humano y al mundo que lo rodea hacia horizontes inimaginables. Desde una edad temprana, ha sido mi aspiración formar parte de aquellos que contribuyen a ese avance, promoviendo que este desarrollo pueda ser accesible y asequible para toda la sociedad.

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo principal el desarrollo de tecnología que permita mejorar el funcionamiento de modelos de grippers existentes, mediante el uso de materiales asequibles. Asimismo, busca demostrar que es posible encontrar soluciones económicas a problemáticas complejas de ingeniería, apoyándose en la creatividad, la matemática y los principios fundamentales de la ingeniería.

De igual manera, este trabajo de graduación demuestra todo lo aprendido durante mis estudios de Ingeniería Mecatrónica, carrera a la cual le estoy muy agradecido, ya que me ha permitido ampliar mi perspectiva, adentrarme en el mundo de la ciencia y la ingeniería, y reafirmar mi pasión por el desarrollo tecnológico.

Me gustaría dedicarle este trabajo de graduación a mi familia y expresarles mi más profundo agradecimiento por siempre estar para mí durante todos estos años de preparación académica. A mi hermana Sofia, por ser la motivación para superarme y poder ser un ejemplo para ella.

A mis abuelos paternos Larry y Ruth, por su cariño incondicional, por estar orgullosos de mí y por esperar para verme graduado.

A mis abuelos maternos Lidio y Nineth, por ser mis segundos padres, por tanto amor y buenos recuerdos juntos y por siempre estar pendientes de mí.

Y por sobre todo a mis 2 padres Larry y Barbara por ser un ejemplo de perseverancia, profesionalismo y honradez, por darme todas las herramientas para poder cumplir mi meta de ser ingeniero mecatrónico y por ser el pilar que me sostuvo cuando la vida fue complicada.

Prefacio	III
Lista de figuras	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Alcance	8
6. Marco teórico	9
6.1. Efector final	9
6.1.1. Efector final de manipulación	9
6.1.2. Efector final de tareas específicas	10
6.2. Mecanismo de <i>gripper</i> : con múltiples dedos adaptables	11
6.3. Análisis de posición de mecanismos	11
6.3.1. Análisis gráfico	12
6.3.2. Síntesis de posición	12
6.4. Cinemática directa	13
6.5. Convención de Denavit-Hartenberg	13
6.6. Cinemática diferencial	15
6.7. Cinemática inversa	16
6.8. Control de fuerza	16
6.9. Programación Multithreading	18

6.10. Sistema de captura de movimiento	19
7. Diseño mecánico/electrónico y manufactura del <i>gripper</i>	21
7.1. Diseño mecánico del <i>gripper</i>	21
7.1.1. Diseño mecánico de los dedos del <i>gripper</i>	21
7.1.2. Diseño mecánico de la base del <i>gripper</i>	25
7.1.3. Manufactura del <i>gripper</i>	28
7.1.4. Reconocimiento del <i>gripper</i> en el ecosistema Robotat	30
7.2. Diseño y evaluación del circuito de medición de corriente	33
7.2.1. Diseño del circuito	33
7.2.2. Evaluación del circuito	35
7.2.3. Fabricación y ensamblaje de las <i>PCB</i>	37
7.2.4. Estimación del torque de los servomotores	38
8. Cinemática de los dedos del <i>gripper</i> como manipuladores	40
8.1. Matriz de parámetros Denavit-Hartenberg del dedo	41
8.2. Cinemática directa de dedo	42
8.3. Jacobiano	43
8.4. Cinemática inversa del manipulador	43
8.4.1. Cinemática implementada en el microcontrolador	46
9. Conclusiones	48
10.Recomendaciones	49
11.Bibliografía	50
12.Anexos	53
12.1. Repositorio en Github	53
12.2. Vídeos	53
12.2.1. Prueba preliminar de medición de corriente de servomotor	53
12.2.2. Prueba de medición de corriente mediante puerto serial	53
12.2.3. Prueba de reconocimiento del gripper dentro del ecosistema robotat	53
12.2.4. Prueba de manipulación de objetos	54
13.Glosario	55

Lista de figuras

1.	Modos de operación del <i>gripper</i> BLT [4]	3
2.	Representación gráfica del sensor PapillArray y de su funcionamiento [5] . . .	3
3.	Representación gráfica del acoplamiento del sensor capacitivo de fuerza [6] . .	4
4.	<i>Gripper</i> Planar [9]	10
5.	<i>Gripper</i> BLT con 3 dedos independientes [4]	10
6.	Tipos de agarre compatible. a) Mecanismo trapezoidal de 4 barras. b) Dedo Sub-Actuado usando tendones y juntas. c) Dedo obediente utilizando estructuras flexibles. d) Dedo de material inflable actuado con aire a presión [4] . .	11
7.	Solución de un mecanismo de 4 barras a través de análisis gráfico [11]	12
8.	Lazo vectorial de posición de un mecanismo de 4 barras [11]	12
9.	Matriz de cinemática directa de un manipulador serial [12]	13
10.	Ilustración de los parámetros de Denavit-Hartenberg [12]	14
11.	Operación de transformación de Denavit-Hartenberg [12].	15
12.	Diagrama de bloques del algoritmo de cinemática inversa con pseudo-inversa del jacobiano [16]	17
13.	Diagrama de bloques de un sistema con control por retroalimentación [19] . .	18
14.	Diagrama de bloques de un controlador PID en formación paralela[18]	18
15.	Dedo de <i>gripper</i> realizado, con 4 grados de libertad	22
16.	Pieza encargada del movimiento lateral del dedo y la unión del segmento encargado de la flexión	23
17.	Eslabones del dedo realizado	23
18.	Acople de servomotor y eslabones utilizado en el dedo	24
19.	Segunda iteración de dedo, utilizando un acople formando parte de la pieza .	24
20.	Base del <i>gripper</i> :	26
21.	Vista seccionada del ensamble de la base del <i>gripper</i> :, servomotores y las placas stackeadas	27
22.	Partes que componen la base del <i>gripper</i>	27
23.	Vista superior de la base para PCB'S	28
24.	Acople de servomotor a eslabón	29
25.	Manufactura realizada del diseño de dedo	29
26.	Impresión de la base superior	30

27.	Manufactura final del <i>gripper</i>	30
28.	<i>Gripper</i> con esferas retroreflectantes en la punta de los dedos	31
29.	Poses utilizadas en la prueba de reconocimiento del <i>gripper</i> en el ecosistema Robotat	32
30.	Circuito High-Side sensing [29]	34
31.	Circuito de medición de corriente realizado	35
32.	Evaluación del funcionamiento del circuito	36
33.	PCB:s stackeadas del <i>gripper</i> ensambladas	38
34.	Modelo de las juntas del dedo	40
35.	Diagrama con parámetros DH del dedo	41
36.	Parámetros Denavit-Hartenberg del dedo	41
37.	Modelo SerialLink del dedo	42
38.	Comparación de pose obtenida mediante cinemática directa	43
39.	Jacobiano obtenido con vector de configuración de prueba	43
40.	Pose final generada por cinemática inversa orientada en posición con diferentes métodos de obtención del jacobiano inverso	44
41.	Convergencia de configuraciones de cinemática inversa orientada en posición con diferentes métodos de obtención del jacobiano inverso	44
42.	Pose del modelo con la configuración obtenida de Levenberg-Marquardt, to- mando en cuenta orientación	45
43.	Convergencia de configuración, realizada por Levenberg-Marquardt, tomando en cuenta orientación	45
44.	Pose final resultante de la configuración de cinemática inversa en la función teach	46
45.	Funciones empleadas para generar el cálculo numérico de la estimación de fuerza en el efector final	47

Con este trabajo se busca mejorar la versatilidad y funcionamiento de la iteración del gripper planar realizado en [1] y generar una alternativa a la problemática del conocimiento de la fuerza que aplica el gripper y utilizarla para aplicar control de fuerza.

Para mejorar la versatilidad del gripper se realizó un gripper no planar de múltiples dedos independientes por medio de técnicas de impresión 3D y servomotores para otorgar la movilidad de cada una de los 12 grados de libertad del gripper. El diseño del gripper y la inclusión de una alta cantidad de grados de libertad lo hicieron mucho mas versátil que la iteración pasada.

Para conocer la fuerza aplicada se estimó la fuerza por medio de los torques de cada uno de los servomotores y la cinemática de los dedos que componen el gripper. De esta manera se pudo determinar la fuerza que ejerce cada uno de los dedos al objeto en sus 3 componentes vectoriales (X, Y y Z).

El sistema de estimación de fuerza consta de cálculos de cinemática simbólica realizada en el microcontrolador utilizado y un circuito medidor de corriente para el calculo de los torques de cada uno de los servomotores.

El gripper presentó mejores resultados en la versatilidad, conocimiento de la fuerza aplicada y reconocimiento en el sistema mocap del robotat en comparación a su iteración pasada.

The aim of this work is to improve the versatility and performance of the planar gripper iteration carried out in [1] and generate an alternative to the problem of knowledge of the force applied by the gripper and use it to apply force control.

To improve the versatility of the gripper, a non-planar gripper with multiple independent fingers was made using 3D printing techniques and servomotors to provide the mobility of each of the 12 degrees of freedom of the gripper. The design of the gripper and the inclusion of a high number of degrees of freedom made it much more versatile than the previous iteration.

To know the applied force, the force was estimated through the torques of each of the servomotors and the kinematics of the fingers that make up the gripper. In this way it was possible to determine the force that each of the fingers exerts on the object in its 3 vectorial components (X, Y and Z).

The force estimation system consists of symbolic kinematic calculations performed on the microcontroller used and a current measuring circuit for the calculation of the torques of each of the servomotors.

The gripper showed better results in versatility, knowledge of the applied force and recognition in the robotat mocap system compared to its previous iteration.

CAPÍTULO 1

Introducción

Debido a que el manipulador serial R17 de la Universidad del Valle carece de un efector final y esta carencia ocasiona que no pueda efectuar trabajos de manipulación de objetos, en [1], se realizó un *gripper*: planar.

Dicho *gripper*: presentó ciertas dificultades en la manipulación de objetos pequeños, reconocimiento dentro del Robotat y en la medición de fuerza para el control por retroalimentación.

Es por esto que en este trabajo se planteó un *gripper*: en una configuración no planar de 3 dedos. Este diseño permite tener una mayor versatilidad, una mejor capacidad de manipulación y un mejor reconocimiento dentro del ecosistema Robotat [2].

Así mismo se diseñó un sistema de medición nuevo realizado por medición de corriente. El cual brinda la capacidad al manipulador de tener una estimación correcta de la fuerza que aplica. Es importante que el *gripper*: pueda estimar la fuerza para que pueda tener una mejor versatilidad hacia los objetos a manipular.

La Universidad del Valle de Guatemala posee un manipulador serial R17 de ST. Robotics en el ecosistema Robotat. Este manipulador carece de un efector final para manipulación (*gripper*), parte fundamental de cualquier manipulador.

El ecosistema robotat consta de la implementación de una red de comunicación inalámbrica dentro de la Universidad del Valle de Guatemala que ayude a incentivar el aprendizaje de robótica y que dicho espacio sea accesible a la comunidad de la universidad. El proyecto fue iniciado en el trabajo de graduación de José Andrés Castañeda [2]. Actualmente se fue acoplado un sistema de captura de movimiento Optitrack en el trabajo de graduación de Camilo Perafan Montoya [3], el cual permite el reconocimiento de objetos dentro del espacio de trabajo por medio de cámaras de reconocimiento.

Anteriormente se desarrolló un *gripper*: planar en el año 2021[1]. Este proyecto tuvo el objetivo de implementar un efector final controlado inalámbricamente que fuera altamente habilidoso y que fuera implementable dentro del sistema de captura de movimiento Optitrack. Una debilidad dentro de este proyecto fue que el *gripper*: no tenía una manera eficiente de medir la fuerza que este aplicaba. Rony Schumann recomendó agregar un mecanismo o sensor que reconozca la fuerza que aplica el manipulador y que funcione óptimamente a diferencia del FSR 402 empleado. Así mismo indicó que el sistema de captura de movimiento tuvo puntos ciegos del efector final, recomendó utilizar una posición específica para que funcionara dentro del sistema [4].

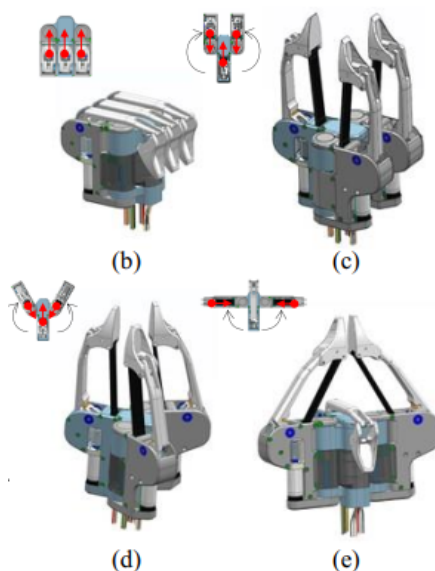
Versatilidad del *gripper*:

En [4], se realizó un *gripper*: de 5 grados de libertad y 3 dedos. Este modelo de efector final posee una alta versatilidad ya que puede trabajar en múltiples formas: pinzas planares paralelas de 2 dedos, de 3 dedos con 2 lados paralelos, 3 dedos planos simétricos y como una garra empuñada. Se puede ver un ejemplo de los modos de trabajo en la Figura 1. El problema de este efector final fue que no poseyó medidores de torque en sus articulaciones,

ni sensor de fuerza en las puntas del dedo. Los autores indicaron que para tener un mejor control y versatilidad agregar esto en un futuro es de mucha importancia.

En [1], como fue mencionado, el autor recomendó utilizar mas mocap Optitrack dentro del espacio de captura para que el *gripper*: fuese reconocido de mejor manera en el robotat.

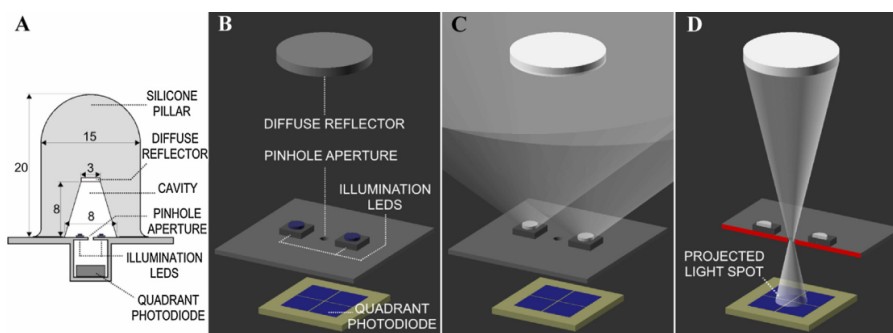
Figura 1. Modos de operación del *gripper* BLT [4]



Sensor de fuerza (3D Force Sensor)

Para emplear un sensor de fuerza dentro del manipulador [5] propuso emplear el tipo de sensor PapillArray, Figura 2, este fue un arreglo de pilares de silicón independientes con ciertos diodos que emiten iluminación a una placa reflectora y por medio de foto-receptores, los cuales se encuentran después de un pequeño agujero donde pasa la luz, pueden conocer el desplazamiento X, Y y Z que hubo en su estructura. Esto le permite al sensor obtener la fuerza que provoca el desplazamiento que ocurrió en el pilar para alcanzar dicha posición. El sensor se basa en el principio de la cámara estenopeica.

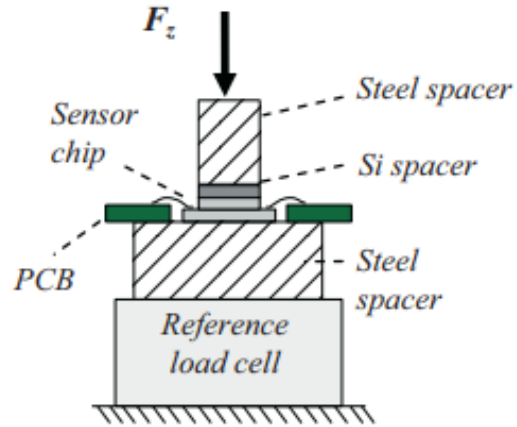
Figura 2. Representación gráfica del sensor PapillArray y de su funcionamiento [5]



En [6], se desarrolló un sensor de fuerza por medio de placas capacitivas, Figura 3. Aprovechando que la relación de la capacitancia de las placas es negativamente inversamente

proporcional a la fuerza que se le aplica, el sensor posee 4 cuadrantes capacitivos, gracias a esto fuerzas asimétricas y momentos pueden ser detectados midiendo la capacitancia diferencial de cuadrantes opuestos.

Figura 3. Representación gráfica del acoplamiento del sensor capacitivo de fuerza [6]



Sistema de captura OptiTrack

En [7], se generaron herramientas para la utilización del manipulador serial R17 inalámbricamente dentro del sistema de captura Optitrack (Robotat). Dentro de este paquete de herramientas se encuentra un controlador de R17 que nos permite utilizar Cinemática Directa, Cinemática Inversa y un Generador de trayectorias. Para cada una de estas formas de control, la herramienta nos genera una simulación del cambio de poses, con el objetivo de corroborar que la instrucción no ocasione colisiones en el manipulador.

El objetivo de este trabajo es proponer e implementar un modelo que mejore la versatilidad y la funcionalidad que presentaba la fase anterior del manipulador [1], la cual presentó problemas en la manipulación de ciertos objetos, diámetros menores a 4cm y pequeños no circulares menores a 3.5 cm de ancho. Schumann indica que esto pueda deberse a la rutina que empleó para el control del manipulador, la cual fue únicamente establecer una posición final, lo que generó que se perdiera torque en los últimos centímetros de apertura y cierre de la pinza.

En [1] se empleó un sensor resistivo de fuerza (FSR402) acoplado en la pinza del manipulador planar y en la curva de la misma. Dicha forma de emplear el sensor ocasionó que no se desempeñara una medición correcta. Emplear un control por retroalimentación que permita aplicar la fuerza real necesaria para manipular objetos, incluso para objetos pequeños es parte de los objetivos específicos de este proyecto. Para ello se necesita un mecanismo o sensor que brinde esta información.

Actualmente en la industria existen sensores llamados “3D Force Sensor” los cuales son empleados en dedos de prótesis humanoides y en piernas de robots cuadrúpedos, para medir la fuerza que aplican y por medio de herramientas de control poder interactuar con el mundo. El problema con estos sensores es el costo elevado que tienen. De [5] y en [6] se sabe que existen opciones de sensores de fuerza empleados en *gripper*:s que sean de menor costo a los 3D Force Sensor y que simultáneamente cumplen con el objetivo de control. Uno de los objetivos específicos del trabajo de graduación será emplear alguna alternativa a dichos sensores, pero que permitan un buen reconocimiento de la fuerza para aplicar el control de retroalimentación.

Adicionalmente, en [1] se recomendó el uso de mas marcadores Optitrack para hacer que el *gripper*: fuera reconocible dentro del ecosistema Robotat, sin embargo, emplear un diseño diferente al *gripper*: planar podría ser otra opción valida ya que la inversión de mas sistemas de reconocimiento OptiTrack es bastante alta. Implementar una forma parecida al modelo de [4], que cuenta con diferentes formas de manipulación (modelo de 3 dedos con 2 lados paralelos o 3 dedos con planos simétricos), podría servir para mejorar el reconocimiento del

gripper: en el ecosistema Robotat.

Con lo mencionado, este proyecto mejorará los resultados obtenidos en la implementación del *gripper*: de la fase anterior, logrando una mayor versatilidad de manipulación y un mejor reconocimiento en el sistema de reconocimiento.

4.1. Objetivo general

Desarrollar un *gripper*: no planar para el brazo robótico R17 capaz de manipular objetos y operar dentro del ecosistema Robotat.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar un *gripper*: habilidoso de 3 dedos que presente retroalimentación de fuerza.
- Proponer e implementar un sensor de fuerza adecuado a las tareas de manipulación a realizar por el robot R17.
- Obtener un diseño mecánico tal que el *gripper*: sea detectable por el sistema de captura OptiTrack en su mayoría de posiciones y orientaciones.

El propósito de este trabajo es diseñar un *gripper*: no planar, de 3 dedos, capaz de manipular objetos y de utilizarse en el robot R17. Uno de los objetivos de este efector final es que sea versátil, para que pueda implementarse en un futuro diferentes técnicas de sujeción y manipulación. En el presente trabajo de graduación no se investigó ni aplicó métodos complejos o alternativos de control, si no que se enfocó en el desarrollo del *gripper*: y en la versatilidad que pueda tener.

Así mismo, otro de los objetivos específicos de este trabajo es el desarrollo de un sensor de fuerza, con el objetivo de implementar un control de fuerza. Por esta razón, el presente trabajo no se limita al desarrollo de un sensor como tal si es que se encuentra una manera más eficiente de realizar el control de fuerza.

Cabe recordar que el *gripper*: debe ser reconocible dentro del espacio del ecosistema Robotat, [2] y [3], y se debe de tomar esto en cuenta en el diseño del mismo, sin embargo, no es parte de este trabajo manipular objetos con información que brinde el sistema de captura de movimiento. El proyecto de graduación se reserva únicamente a verificar que el *gripper*: no planar pueda identificarse y reconocerse dentro del Robotat.

6.1. Efector final

En la industria robótica, el efector final, también llamado manipulador, es el dispositivo que permite al robot interactuar con el entorno de trabajo en el que se encuentra. Se encuentra en la parte final del brazo robótico. Es el encargado de manipular objetos o realizar las tareas específicas que se le proponga. Son accionados, por lo general, eléctricamente o electro/hidráulicamente. Se dividen en 2 grandes tipos: de manipulación y de tareas específicas [8].

6.1.1. Efector final de manipulación

Este tipo de efector final se enfoca en la manipulación, sujeción y traslado de objetos. Son usados para tareas como recoger y colocar (Pick and place), manipulación, almacenamiento, protección y control de materiales. También son usados en líneas de ensamblaje y distribución de objetos. Existen muchos tipos y estos varían desde la forma de sujeción hasta la fuerza y precisión que emplean [9]. Entre estos tipos se tienen:

Gripper: Planares. Uno de los tipos de manipuladores más simples, consta de una pinza como se ve en la Figura 4. Se utilizan para muchos objetos, pero en especial para objetos con superficies paralelas lisas.

Gripper:s con múltiples dedos adaptables. Es de las variantes más nuevas de manipuladores. Esta conformado por 3 o más dedos o agarradores los cuales pueden ser independientes o dependientes. El objetivo de este manipulador es lograr un agarre para un gran rango de objetos incluso para objetos irregulares, suaves y esféricos. El *gripper*: puede implementar un control de retroalimentación de fuerza para lograr un agarre que se adapte a el objeto a manipular.

Figura 4. *Gripper* Planar [9]



Figura 5. *Gripper* BLT con 3 dedos independientes [4]



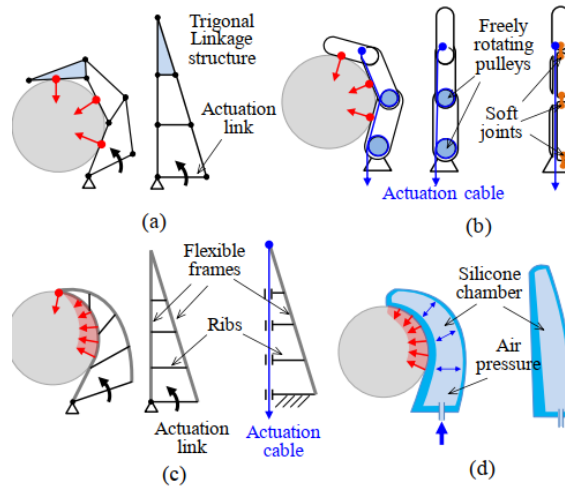
6.1.2. Efector final de tareas específicas

Son efectores diseñados específicamente para una tarea en especial, no son versátiles. Por ejemplo, para la tarea de soldadura existen brazos robóticos con un efector final que posee una pistola de soldadura y puede aplicar soldadura en el área de trabajo del robot. Por este motivo existen muchos tipos para diferentes tareas, las comunes son de soldadura, maquinado y pintura.

6.2. Mecanismo de *gripper*: con múltiples dedos adaptables

El mecanismo de agarre para este tipo de efector puede ser diseñado para precisión o potencia. Cuando el mecanismo es diseñado para potencia con un alto grado de adaptabilidad se le es llamado agarre obediente. Utilizar agarre obediente nos permite implementar un menor grado de complejidad mecánica y reducir el numero de actuadores que tendrá el *gripper*:. En la Figura 6, se muestran algunos tipos de mecanismos de agarre obediente.

Figura 6. Tipos de agarre compatible. a) Mecanismo trapezoidal de 4 barras. b) Dedo Sub-Actuado usando tendones y juntas. c) Dedo obediente utilizando estructuras flexibles. d) Dedo de material inflable actuado con aire a presión [4]



En todos los mecanismos mencionados se tiene un actuador, dicho actuador se acciona sobre el mecanismo para moverse a cierta posición que permita el agarre del objeto. El mecanismo se adapta a la forma del objeto y por medio de un control de retroalimentación de fuerza se le puede aplicar la fuerza necesaria para sostenerlo [10].

Cada dedo puede ser controlado independientemente si posee un actuador individual. Debido a esto el *gripper*: puede tener una alta versatilidad para manipulación de objetos. En el caso del mecanismo trapezoidal de 4 barras y el dedo sub-actuado usando tendones y juntas, la posición de cada dedo puede ser analizado por síntesis de posición como un mecanismo de 4 barras [4].

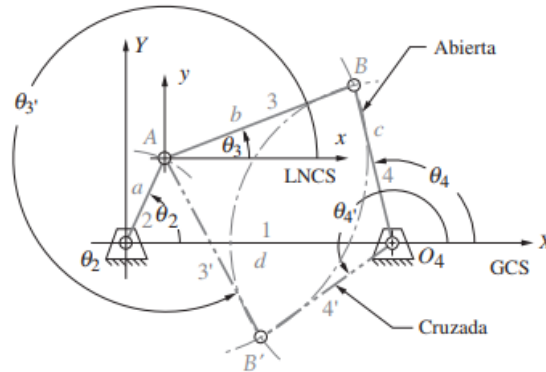
6.3. Análisis de posición de mecanismos

El análisis de posición nos permite conocer cómo se desempeña el mecanismo diseñado. Gracias a este análisis se puede comprobar que se realiza el mejor mecanismo que presente los resultados esperados. Existen varios métodos para analizar la posición y trayectorias del mecanismo.

6.3.1. Análisis gráfico

El análisis gráfico utiliza la geometría del mecanismo para realizar el análisis de posición de sus eslabones. Se realiza un dibujo a escala utilizando regla, compás y transportador para trazar el rango de trabajo que tienen los eslabones respecto a un ángulo de entrada y con esto se construye la solución de posición del mecanismo, como se ve en la Figura 7. Este método es relativamente sencillo de aplicar, pero no es tan preciso ya que depende de lo capaz que sea el dibujante [11].

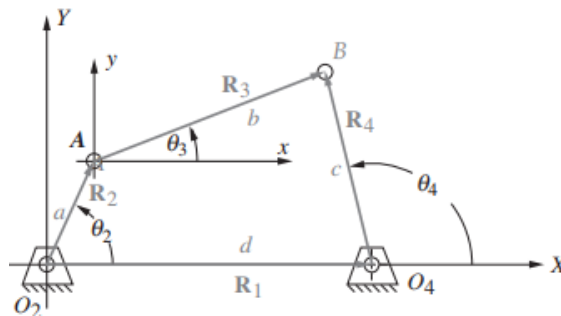
Figura 7. Solución de un mecanismo de 4 barras a través de análisis gráfico [11]



6.3.2. Síntesis de posición

La síntesis de posición codifica las posiciones y ángulos del mecanismo por algoritmos algebraicos. Para complementar este análisis de posición y estandarizar procedimientos se emplea la herramienta lazo vectorial. Esta parte del principio de representar a los eslabones de los mecanismos como vectores de posición, como se puede ver en la Figura 8. El mecanismo en sí estaría siendo una suma de vectores a diferentes ángulos que terminan en el mismo lugar, por lo que la suma de estos es igual a 0. Tomando en cuenta las dimensiones de los eslabones, los grados de libertad y número de componentes en el mecanismo se pueden obtener los ángulos y posiciones de todas sus juntas. Iterando esta síntesis de posición por lazo vectorial a través del rango del ángulo de entrada suministrado se puede obtener toda la trayectoria que realiza el mecanismo.

Figura 8. Lazo vectorial de posición de un mecanismo de 4 barras [11]



En este caso cada uno de los dedos del *gripper*: puede ser analizado y representado por

un mecanismo de 4 barras, Figura 8, por lo que la síntesis de posición nos será de mucha utilidad para verificar el funcionamiento del *gripper*.

6.4. Cinemática directa

La cinemática directa consta de un mapeo entre el espacio de configuración (vector q) y el espacio de tarea de un robot o manipulador serial. Es decir un cálculo de la posición y orientación del marco del efector final en función de las coordenadas variables de sus juntas. En esencia este procedimiento nos brinda un modelo cinemático del robot. La cinemática directa puede ser escrita de la siguiente forma:

$${}^I T_F(q) = {}^I T_B * {}^B T_E(q) * {}^E T_F \quad (1)$$

Donde ${}^I T_B$ se conoce como transformación de base y toma en consideración como está instalado el manipulador respecto a un sistema de coordenadas globales. ${}^E T_F$ es la transformación de herramienta la cual toma en cuenta la herramienta que el robot manipula o presenta como su efector final. Finalmente la parte en donde se concentra la mayoría de la información ${}^B T_E(q)$, es una matriz de transformación variable que se compone de la siguiente manera:

Figura 9. Matriz de cinemática directa de un manipulador serial [12]

$${}^B \mathbf{T}_E(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} {}^B \mathbf{R}_E(\mathbf{q}) & {}^B \mathbf{o}_E(\mathbf{q}) \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

Donde ${}^B R_E(q)$ es una matriz de rotación desde la base del manipulador serial hacia el efector final, Representa la orientación del efector final. Y ${}^B o_E(q)$ es la posición del efector final. Esta matriz describe el movimiento del efector final cuando se realiza una tarea en término del vector configuración del robot.[13] Para el cálculo de esta matriz se usa la convención de Denavit Hartenberg.

El resultado de la cinemática directa es una pose (posición y orientación) del efector final dependiente del vector de configuración que se le es ingresado al manipulador serial.

6.5. Convención de Denavit-Hartenberg

Esta convención es una forma general y sistemática para describir la posición relativa y la orientación de una cadena abierta de juntas. Su principal objetivo es tener una manera estandarizada de calcular la cinemática directa de todo manipulador serial. El sistema consta de acoplar marcos de referencia a cada una de las juntas y luego derivar la cinemática directa

de la información que los desplazamientos relativos entre los marcos de enlace adyacentes proveen [14].

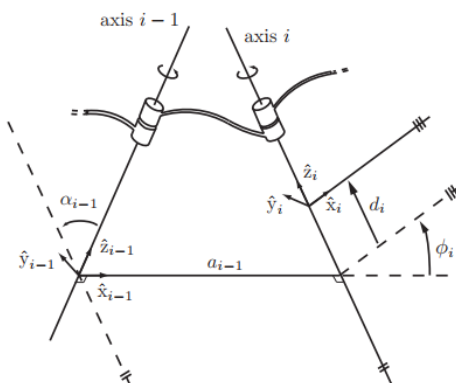
Para que sea válido el uso de la convención, se debe asumir que:

- Cada junta está unida por medio de un eslabón a una junta previa.[13]
 - Los eslabones son rígidos.
 - Las juntas pueden moverse y deben ser: una revoluta o una prismática.
- Cada junta conecta 2 eslabones[13].
- Cada eslabón conecta dos juntas exceptuando el primer y último eslabón[13].
- El manipulador tiene N juntas y $N + 1$ eslabones.

Además de esto un set de reglas de asignación de marco de enlace es primordial para que la convención funcione, [12]:

- Los ejes Z de cada junta debe coincidir con el de la articulación. Al igual que el eje Z_{i-1} (eje previo) debe coincidir con el de la articulación previa.
- El origen del marco de enlace proviene de un segmento de línea ortogonal que interseca con ambos ejes Z_{i-1} y Z_i . Y se localiza en el punto donde la línea interseca con el eje Z_{i-1} .
- El eje x del nuevo marco será entonces en la dirección de la línea perpendicular que va hacia el origen del marco del eje actual.
- Finalmente el eje y del nuevo marco tendrá la dirección del producto cruz entre el eje Z y el eje X obtenido.

Figura 10. Ilustración de los parámetros de Denavit-Hartenberg [12]



Cumpliendo esto, la convención consta únicamente de solo 4 parámetros, 10:

1. Rotación del eje Z , “ θ ”. En juntas revolutas es el parámetro de configuración o variable, Se toma como positivo cuando la rotación va en contra de las manecillas del reloj.

2. Translación en eje Z, “ d ”. En juntas prismáticas es el parámetro de configuración o variable.
3. Translación en eje X, “ a ”. Constante y dependiente de la geometría de la conexión entre eslabones.
4. Rotación del eje X, “ α ”. Constante y dependiente de la geometría de la conexión entre eslabones. Se toma como positivo cuando la rotación va en contra de las manecillas del reloj.

La operación que describe a la transformación de junta a junta entonces es:

$$\mathbf{A}_j \equiv {}^{j-1}\mathbf{T}_j = \mathbf{Rot}_z(\theta_j)\mathbf{Transl}_z(d_j)\mathbf{Transl}_x(a_j)\mathbf{Rot}_x(\alpha_j)$$

Figura 11. Operación de transformación de Denavit-Hartenberg [12].

Este proceso se itera hasta llegar al marco de referencia del efector final, por cada una de sus juntas.

6.6. Cinemática diferencial

La cinemática diferencial nos brinda una relación entre las velocidades de configuración en las juntas y las velocidades lineales y angulares correspondientes al efector final. Dicho mapeo lo describe una matriz denominada **jacobiano geométrico** y este depende de el vector configuración del manipulador [14]. El jacobiano geométrico para un manipulador serial se compone de 2 jacobianos apilados, el primer jacobiano es el de posición (Velocidad lineal) y el segundo es el jacobiano de orientación (Velocidad angular). Para el caso general de manipuladores seriales en 3D se emplea la siguiente metodología:

$$[{}^B v_E; {}^B \omega_{BE}] = [J_v(\mathbf{q}); J_\omega(\mathbf{q})] * d\mathbf{q} \quad (2)$$

J_v , corresponde a el jacobiano de posición y se calcula con la derivada parcial de la cinemática directa respecto a la configuración de las juntas.

$$J_v(\mathbf{q}) * d\mathbf{q} = \frac{d{}^B o_E(\mathbf{q})}{d\mathbf{q}} * d\mathbf{q} \quad (3)$$

J_ω corresponde a el jacobiano de orientación y su calculo presenta problemas debido a que la orientación depende de la representación que esta siendo usada, es por lo mismo que se recurre a la relación:

$$S({}^B \omega_{BE}) = {}^B dR_E * {}^B R'_E \quad (4)$$

$${}^B \omega_{BE} = J_\omega(\mathbf{q}) * d\mathbf{q} \quad (5)$$

Esto indica que la multiplicación de la derivada de la matriz de rotación del efector final por la transpuesta de la matriz de rotación del efector final nos brinda $S({}^B \omega_{BE})$, la matriz skew-simétrica del jacobiano de orientación. Al pasar dicha matriz skew a vector se obtiene el jacobiano de orientación [15].

6.7. Cinemática inversa

La cinemática inversa permite encontrar una configuración del robot necesaria para colocar el efector final del robot en una posición y orientación deseada[12]. Cabe recalcar que para que la cinemática funcione dicha posición debe de encontrarse dentro de el espacio de trabajo del manipulador, es decir debe de ser alcanzable. Esta cinemática es de suma importancia ya que brinda una forma concreta para controlar el robot.

$$e = \begin{bmatrix} e_p \\ e_o \end{bmatrix} \quad (6)$$

Debido a la complejidad de las soluciones de la cinemática inversa viéndose de una perspectiva analítica cerrada, la cinemática es vista desde la perspectiva de control, en el cual se establece un vector de error, e en donde el primero corresponde al error de posición y el segundo a el error de orientación.

Si se supone que la velocidad de configuración es la entrada de control del sistema y que su respectivo jacobiano es una matriz cuadrada y no singular la ecuación:

$$dq = J^\dagger(q) * (d\xi_d + Ke) \quad (7)$$

Provee un sistema LTI globalmente asintóticamente estable siempre y cuando $K > 0$. La arquitectura de este controlador es representado en la Figura 12.

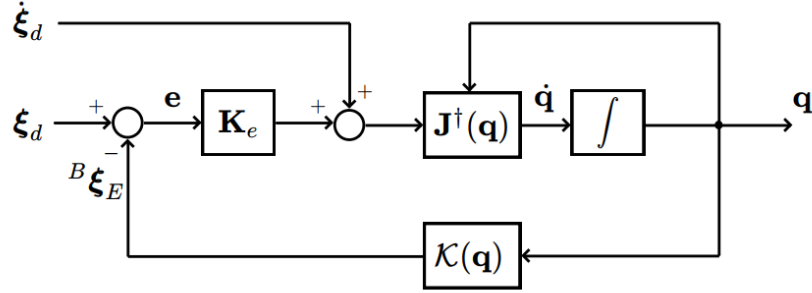
Al no tener siempre el caso ideal en que el jacobiano es una matriz cuadrada y no singular, se emplea , $J^\dagger$, la cual es una aproximación numérica a la definición de jacobiano inverso [14]. Algunos de los métodos mas eficientes y/o efectivos para calcular la inversa del jacobiano, según [16] son:

- **Pseudoinversa:** depende de la relación filas/columnas del jacobiano
 - $J^\dagger = J^T * (J * J^T)^{-1}$ para jacobianos con un numero mayor de columnas que filas.
 - $J^\dagger = (J^T * J)^{-1} * J^T$ para jacobianos con un numero mayor de filas que columnas.
- **Levenberg-Marquardt/Damped Least-Squares:** $J^\dagger = J^T * (JJ^T + \lambda^2 * I)^{-1}$, con $\lambda > 0$ y pequeño. Se comporta mejor cuando la pseudo-inversa todavía presenta singularidades.
- **Traspuesta:** $J^\dagger = J^T$. Numéricamente eficiente y garantiza que el origen, error igual a 0, sea asintóticamente estable, siempre y cuando la pose deseada sea alcanzable.

6.8. Control de fuerza

El control de fuerza en un *gripper*: tiene un papel fundamental en su buen funcionamiento. El control asegura que sea empleada la fuerza necesaria para sostener el objeto a

Figura 12. Diagrama de bloques del algoritmo de cinemática inversa con pseudo-inversa del jacobiano [16]



manipular. Asegurar esto nos permite manipular elementos con diferentes tipos de pesos, fragilidades, materiales, etc y es por esto que es indispensable si se requiere tener un *gripper*: versátil [12].

El control por retroalimentación de fuerza es uno de los controladores estructuralmente mas sencillos, confiables y versátiles que se pueden aplicar a la problemática del *gripper*: [17]. Este método nos permitiría tener un control de fuerza automático por medio de sensores de fuerza que dan a conocer el error que existe entre la salida de la planta (Fuerza suministrada al objeto por el manipulador) y la referencia (Fuerza esperada a suministrar), y con esta información puede actuar con base en ello.

El controlador se representa por el siguiente diagrama 13. El sistema tiene reconocimiento de que cantidad de fuerza está empleando debido a la retroalimentación del bloque “ Sensor” que se observa en la Figura 13 y es por esto que puede calcular si debe entregar menos o más voltaje al motor. El controlador consta de una entrada de referencia (Reference), el bloque controlador (Controller), el sistema o planta (Plant), la información del sensor (Sensor) y una salida (Output).

En este caso el bloque controlador puede ser un controlador proporcional o un controlador PID. El controlador PID es uno de los más usados en la industria y está compuesto por 3 segmentos de control principales como se puede ver en la figura 14, los cuales son:

Proporcional. Su objetivo es reducir el error de la salida y la referencia a cero. La ganancia de este controlador se puede ajustar para seleccionar que tan sensible será a cambios y si debe aumentar o disminuir la salida para ajustarse. [18]

Derivativo. La función de este control es anticipar el comportamiento futuro de la señal de error. Lo hace tomando en cuenta la tasa de cambio que esta señal posee. [18]

Integral. La función de este controlador es quitar o reducir el error en estado estacionario (offset). Y lo realiza por medio de la integración de la señal de error. [18]

Figura 13. Diagrama de bloques de un sistema con control por retroalimentación [19]

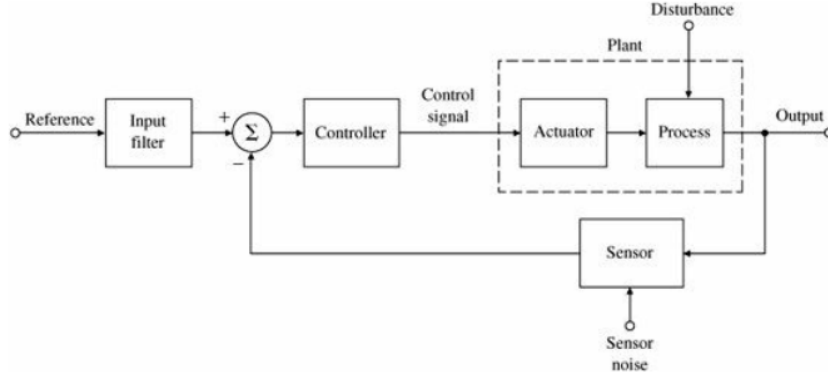
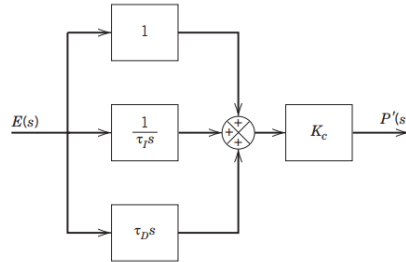


Figura 14. Diagrama de bloques de un controlador PID en formación paralela[18]



6.9. Programación Multithreading

El *Multithreading* es una habilidad de un programa o sistema operativo de manejar múltiples usuarios a la vez o múltiples operaciones de un mismo usuario simultánea y concurrentemente. Cada una de las operaciones o solicitudes que se le indiquen al programa las maneja como un *thread* (hilo) independiente. [20].

Un hilo es una entidad ligera que compone registros, stack y datos y abarca todo lo que una computadora hace para ejecutar un programa tradicional, es parecido al concepto de proceso, sin embargo el proceso es pesado computacionalmente y es una entidad de nivel de kernel. Un hilo generalmente se encuentra en el espacio de trabajo del procesador y es de fácil acceso y global. Es por esto que todos los hilos comparten entre sí el estado del proceso realizado [21].

Existen dos tipos de multithreading:

Concurrencia. Dos o más hilos pueden estar en medio de la ejecución, del mismo o diferente código entre sí, al mismo tiempo. Por ejemplo, un hilo empieza a ejecutar su código, es interrumpido por otro y este otro empieza a ejecutar su código hasta que ocurra otra interrupción o termine de ejecutarlo. Al finalizar esta solicitud se localiza el punto donde fue interrumpido el thread inicial y continúa ejecutando la operación inicial. Usualmente en el caso de un procesador de solo un núcleo, este es el tipo de

multithreading a implementar[21].

Paralelismo. Dos o más hilos se ejecutan al mismo tiempo en diferentes CPU's o en diferentes núcleos de una misma CPU. Cada uno de los procesadores o núcleos ejecutan su hilo por concurrencia[21].

Para implementar la programación *multithreading*, es importante tener una buena sincronización de las actividades de los hilos para evitar que un hilo sobrescriba información accidentalmente que pueda ser utilizada por otro hilo. Esto se puede asegurar mediante un bloqueo de mutua exclusión. Es decir, un hilo bloquea a los demás mientras trabaja en una variable global hasta que termine para que los demás puedan usar esa información con datos consistentes. Además, es importante una buena planificación de los hilos, colocándolos y descolocándolos en la CPU de manera adecuada para que el hilo que lo necesite pueda ejecutarse[21].

El *multithreading* resuelve la problemática de poder de manejar diferentes acciones sin que estas dependan del tiempo de procesado entre sí.

6.10. Sistema de captura de movimiento

Un sistema de captura de movimiento permite el proceso de captura de movimientos, también denominado mocap, el cual consta del registro digital de movimientos de personas u objetos [22]. Estos sistemas son utilizados en una gran variedad de actividades desde entrenamiento hasta en industria militar. En el caso particular de la robótica se puede emplear para la toma de decisiones de vehículos autónomos como drones y brindarle información al algoritmo que se encarga de esto [23]. También es usado para el registro de movimientos humanos y crear movimientos parecidos a los humanos en robots humanoides. Y en el caso de un manipulador serial, le proporciona información sobre su región de trabajo, el entorno que lo rodea y la posición de su efector final. Es útil el uso de mocap para plantear trayectorias o identificar las posiciones de los objetivos para que el manipulador serial llegue a ellos.

Existen diferentes técnicas de captura de movimiento, las más utilizadas son:

Óptica (Pasiva). En esta técnica se adhieren marcadores retrorreflectantes a lo que desea tomar captura de movimientos, ya sea cuerpos u objetos, y reflejan la luz generada cerca del objetivo de la cámara. Al reflejarse dicha luz se utiliza para calcular la posición de los marcadores adheridos dentro del espacio tridimensional y se graban los movimientos [24].

Óptica (Activa). Esta técnica es muy parecida a la Óptica Pasiva, la única diferencia es que los marcadores emiten luz en vez de reflejarla. Los marcadores necesitan una fuente de energía [24].

Sin marcadores. No emplea marcadores de ningún tipo. Utiliza cámaras sensibles a la profundidad y la utilización de un software especializado para identificar y grabar los movimientos [24].

Inercial. Esta técnica no requiere de cámaras para funcionar. Registra movimientos a través de IMU's (Unidades de medición inercial), para medir la velocidad de rotación. Los sensores pueden variar pero se emplean generalmente giroscopios, magnetómetros y acelerómetros [24].

En la Universidad del Valle se encuentra el sistema de captura Optitrack, el cual consta de 6 cámaras integradas al ecosistema robotat donde existe un manipulador serial R17. Dicho mocap presenta la técnica de captura de movimiento de Óptica (Pasiva).

Diseño mecánico/electrónico y manufactura del *gripper*

A continuación se muestra el desarrollo y manufactura del *gripper*: y las etapas y procesos de diseño realizados en el presente trabajo.

7.1. Diseño mecánico del *gripper*

La realización del diseño mecánico del *gripper*: se desarrolló en 2 grandes partes:

- Diseño mecánico de los dedos.
- Diseño de la base del *gripper*:

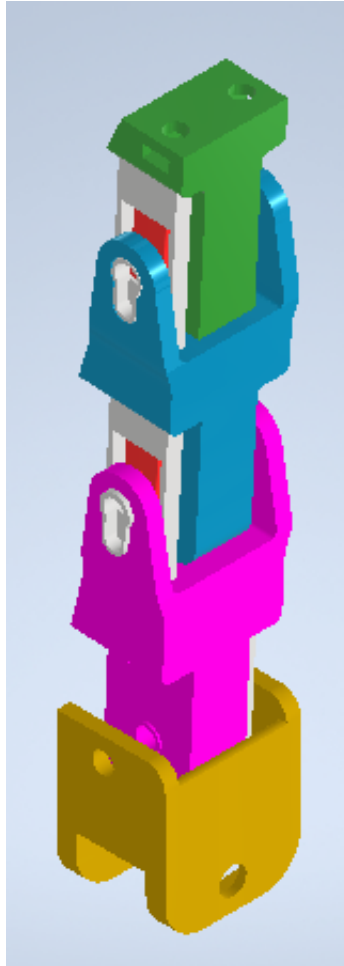
Como el manipulador de este trabajo consta de 3 dedos, se priorizó el diseño y construcción de los mismos para facilitar el desarrollo de la parte móvil del *gripper*:. Adicionalmente, se consideró a cada uno de los dedos como un pequeño manipulador serial. Así mismo, diseñar la base del *gripper*: después de conocer los cables, PCB:s y demás componentes que se deben de almacenar, permitió tener un mejor trabajo y un proceso de diseño óptimo.

7.1.1. Diseño mecánico de los dedos del *gripper*

Para el diseño de los dedos del *gripper*: se tomó en cuenta la morfología general de un dedo humano. El mecanismo del dedo consta de 3 falanges o eslabones y 4 grados de libertad. Los 4 grados de libertad corresponden a 3 revolutas paralelas que conectan las 3 falanges y permiten la flexión del dedo y un último grado de libertad el cual consta de una rotación perpendicular a las falanges, como se puede observar en la Figura 34. Luego de esto

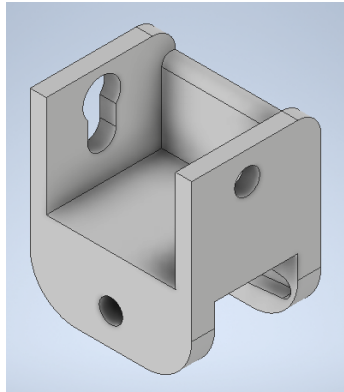
y empleando el software Inventor de Autodesk [25], se generó un modelo CAD:, el cual se puede ver en la Figura 15, que puede recrear los grados de libertad del dedo y que tiene eslabones semejantes a los de un dedo humano.

Figura 15. Dedo de *gripper* realizado, con 4 grados de libertad



En el primer eslabón, Figura 17a, se colocó el primer servomotor: encargado del movimiento completo del dedo en voladizo. A este eslabón se le es acoplado una pequeña pieza, Figura 16, encargada de unir al 1er eslabón con la base y simultáneamente acopla a un 2do servomotor, en la parte inferior de la pieza, encargado de dar una rotación perpendicular al dedo. Estas 2 piezas corresponden al inicio del dedo y permiten la conexión del mismo a la base del *gripper*..

Figura 16. Pieza encargada del movimiento lateral del dedo y la unión del segmento encargado de la flexión

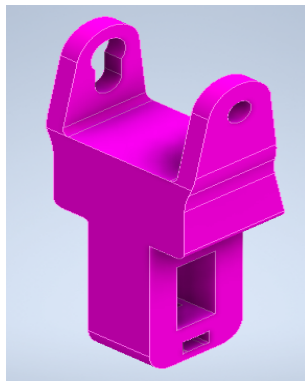


En el segundo y tercer eslabón, Figuras 17b y 17c, se colocan los servomotores restantes encargados del movimiento de flexión del dedo.

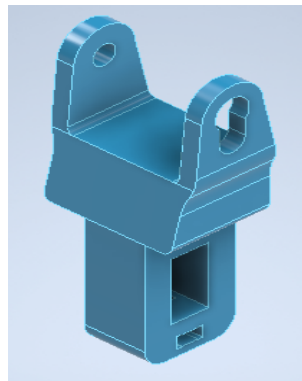
En el tercer eslabón se encuentra el efector final del dedo. Este será el lugar donde aplica fuerza el manipulador. Tomando en cuenta esto y el objetivo de hacer que el *gripper* sea reconocible en el Robotat, se colocó en la punta del eslabón 3 un tornillo M4. Su función es permitir el acople de una pequeña esfera de material reflectante, utilizado por el sistema de captura de movimiento para reconocer un marcador. Esto permite tener un punto específico reconocible de efector final por dedo, para el control del *gripper* y la manipulación de objetos.

Figura 17. Eslabones del dedo realizado

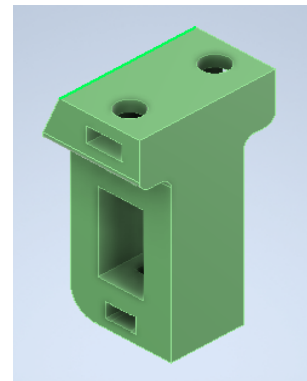
(a) Primer eslabón.



(b) Segundo eslabón.

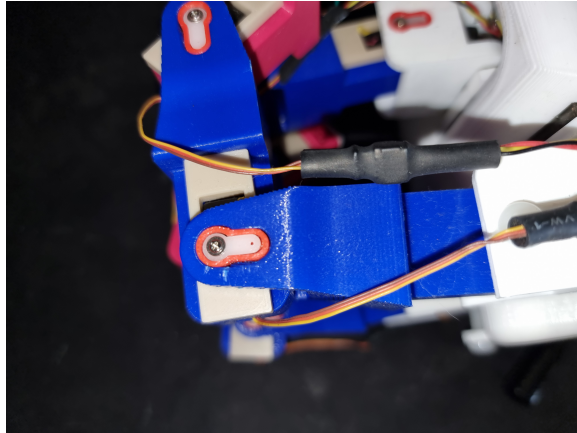


(c) Tercer eslabón.



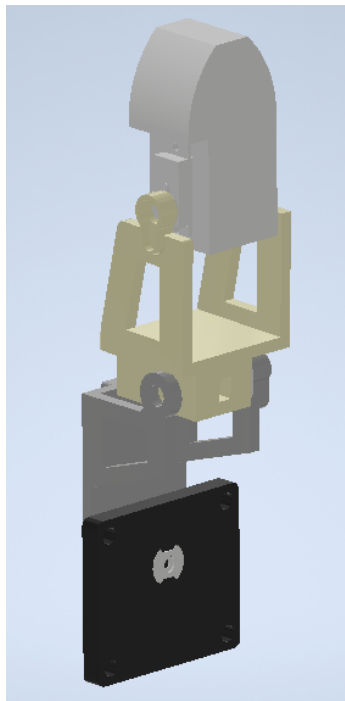
El acople de los servomotores con las bases del dedo, fue realizado por medio de piezas pequeñas impresas en PLA, Figura 18 y tornillos M5 plásticos como eje entra ambas piezas. Dicho acople fue pensado con el objetivo de ser fácil de cambiar y de ajustar su tamaño para garantizar una mejor sujeción al servomotor. Debido a que las piezas fueron manufacturadas en impresión 3D, la tolerancia de las maquinas es algo que podía afectar de gran manera a la sujeción de las piezas, transmisión de potencia, control y movilidad del *gripper*. Por lo que tener dichas piezas ayudo mucho al funcionamiento del acople.

Figura 18. Acople de servomotor y eslabones utilizado en el dedo



En las primeras iteraciones, Figura 19, el acople formaba parte de la pieza. Como se comentó, las impresoras 3D tienen tolerancias altas, por lo que en ocasiones el acople no garantizaba una sujeción correcta. Para corregir esto se debe ajustar el tamaño del acople y reimprimir la pieza entera. Lo cual era un gasto de recursos muy alto, tanto de tiempo como económico, para asegurar una sujeción correcta. Esta problemática fue arreglada en la siguiente iteración creando una pieza específica externa a la pieza principal, de menor tamaño y volumen, que se pudiera modificar rápida y económicamente para asegurar dicha sujeción sin tener que repetir la pieza entera.

Figura 19. Segunda iteración de dedo, utilizando un acople formando parte de la pieza



Selección de los servomotores para los dedos

Debido a los 4 grados de libertad que se buscan, se optó en utilizar 4 servomotores por dedo, es decir un servomotor por grado de libertad, obteniendo a cambio una mayor versatilidad.

Los motores que se emplearon en los dedos, fueron los nano servomotores digitales Traxxas 6348 [26] y los servomotores MG90S. Los modelos 6348 fueron seleccionados debido a su pequeño tamaño. Su tamaño permitió tener un diseño 3D mucho más reducido en comparación a usar servomotores normales, lo cual fue un factor clave en la elección de motor. Además, al ser servomotores digitales proporcionaron un control preciso de la posición de la junta, siendo de gran utilidad a la hora de tener una correcta manipulación. Finalmente, otro factor que se tomó en cuenta es que estos nano servos estaban disponibles en la Universidad y permitió que se empezara a diseñar el dedo lo antes posible.

Los servomotores MG90S fueron seleccionados para el movimiento lateral del dedo debido a que en esta área del dedo se presenta la mayor carga al manipular objetos y este modelo posee la capacidad de dar mas torque que los 6348. El dedo por completo y la carga se encuentran en voladizo. Debido a estas condiciones los engranes de metal, del MG90S, fueron otro factor clave para la selección de servomotor. Esta característica los hace mas resistentes a cargas mas elevadas y al desgaste del uso.

7.1.2. Diseño mecánico de la base del *gripper*

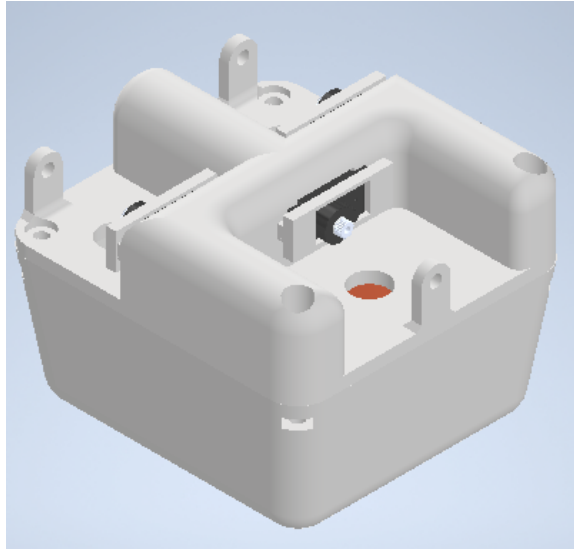
Para el diseño de la base, fue útil realizar primero lo mencionado en el capítulo 7.2, ya que para tener un correcto conocimiento de dimensiones y espacios se necesitó primero conocer qué es lo que la base debería almacenar, junto con el espacio necesario para la manipulación adecuada de los cables. La base permite el manejo correcto de los cables de alimentación y control, posee un espacio adecuado para las placas stackeadas y acopla los 3 dedos del *gripper*: a la base.

La base consta de dos partes:

- Base para los dedos.
- Base para PCB:s y alimentación del *gripper*..

Estas dos partes son independientes y se unen por medio de 4 tornillos M5 y sus respectivas tuercas. Están ubicados en las esquinas de la base, como se puede ver en la Figura 20.

Figura 20. Base del *gripper*:



La base para los dedos almacena a los 3 servomotores MG90s, estos se insertan y acoplan por medio de acoples de fijación impresos con tecnología 3D, Figura 24. Los servomotores se acoplan a cada una de las piezas de la Figura 16 permitiendo la unión entre el dedo y la base.

Así mismo en donde se ubican cada uno de los dedos se realizó un canal para guiar los cables de los servomotores hacia la zona inferior en dirección a las placas de alimentación. La dimensiones de la base superior son de 125x115x35 mm. La base posee 2 dedos en el costado de dimensión 125mm y el otro dedo en su contraparte de 115mm, como se puede ver en la Figura 22a.

Para la base de las PCB:s, las dimensiones de esta son 125x115x40 mm. Esta base se encarga de acoplar las placas stackeadas de la Figura 33. Así mismo tiene el espacio suficiente para manejar los cables de alimentación y control de los servomotores y los provenientes del microcontrolador, como se puede ver en la Figura 21. También cabe mencionar que se empleó un loft de 7.5 deg, con el objetivo de emplear menos material para impresión y que la pieza fuera mas estética.

Además de esto, esta parte de la base posee orificios en la parte inferior para su acople al manipulador serial R17 mediante tornillos, como se puede ver en la Figura 23. Estos están basados en los realizados en el trabajo de graduación de Rony Schumann[1].

Figura 21. Vista seccionada del ensamble de la base del *gripper*., servomotores y las placas
stackeadas

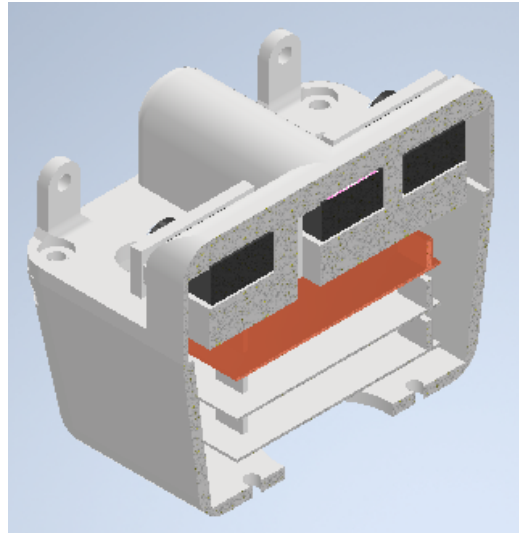
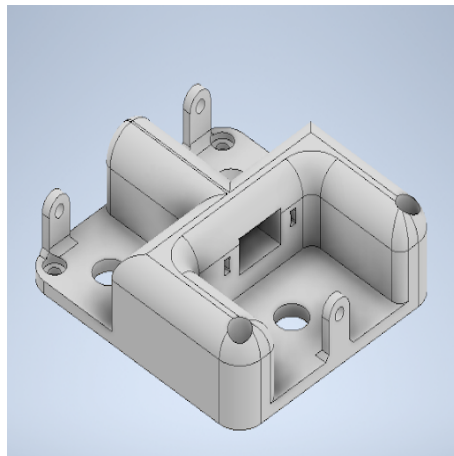


Figura 22. Partes que componen la base del *gripper*

(a) Base acople dedos.



(b) Base para PCB:s.

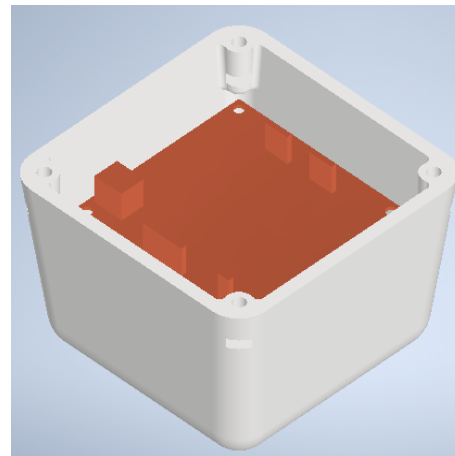
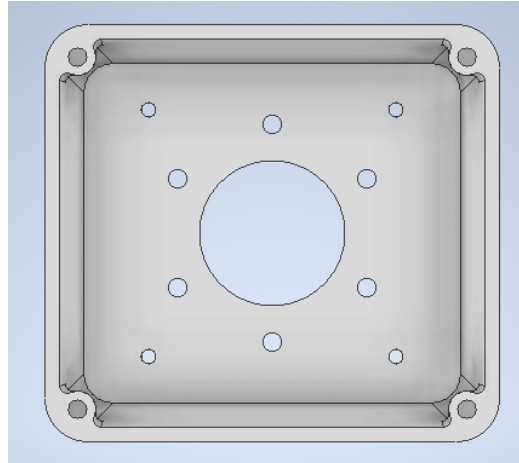


Figura 23. Vista superior de la base para PCB'S

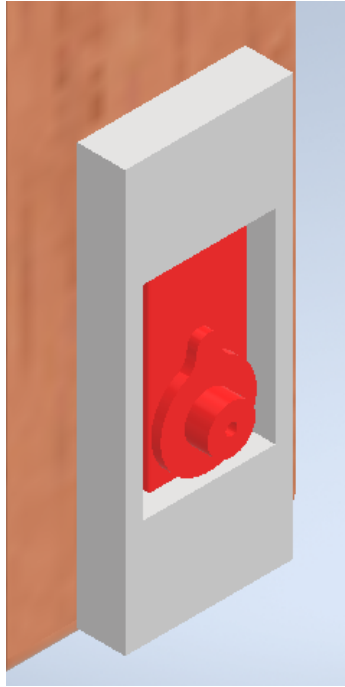


7.1.3. Manufactura del *gripper*

Para la manufactura del *gripper*: se realizó la primera versión en una mezcla de técnicas entre corte láser de MDF de 3 mm e impresión 3D. Inicialmente el eslabón 1 fue diseñado como un servo *bracket* de 2 grados de libertad. Esta pieza fue hecha por medio de corte láser. Sin embargo, a pesar de que era funcional no cumplía con el requisito de tener la forma de un dedo normal y presentar pequeñas dimensiones. Por esta razón se reestructuró a lo mostrado anteriormente en la Figura 22a. Después de esto, la manufactura del resto de las demás piezas fue realizada con impresión 3D en las impresoras Ultimaker 3 [27] que posee la Universidad del Valle.

Al implementar la primera versión del *gripper*: se encontraron aspectos a mejorar en el acople de los servomotores a los eslabones. El problema identificado fue el pequeño tamaño de los tornillos (M1.6) , utilizados usualmente en el acople de este tipo de servomotor, los cuales son escasos (localmente) y bastante costosos, elevando significativamente los costos del trabajo, por lo que se recurrió a una alternativa utilizando pequeñas piezas, realizadas por impresión 3D, que sostuvieran al servomotor como se ve en la Figura 24.

Figura 24. Acople de servomotor a eslabón



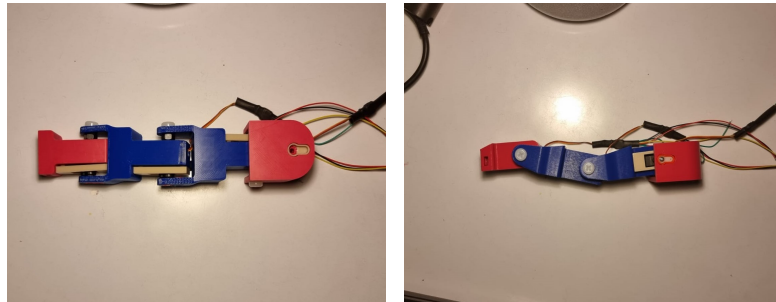
Otro aspecto modificado fue el colocar un tornillo M5 como eje de soporte en la conexión de dos eslabones por medio del servomotor. Originalmente se intentó realizar mediante impresión 3D, para que estos fueran integrados a las piezas. Sin embargo, debido a las tolerancias de las impresoras, controlar la fricción en el eje representaba un problema. Por esto mismo se cambió a tornillos y agujeros un poco más grandes. La única utilidad de esto es quitarle posibles torques, cargas innecesarias y obstrucciones al servomotor.

En la siguiente Figura 25, se puede observar la impresión de piezas y ensamblaje de un dedo del manipulador final. Esta manufactura se repitió para los tres dedos del *gripper*..

Figura 25. Manufactura realizada del diseño de dedo

(a) Vista frontal.

(b) Vista lateral.



La manufacturación de la base se realizó mediante técnicas de impresión 3D, y estas fueron impresas individualmente. Se unieron las dos bases por medio de tornillos M5 ubicados en la base superior y tuercas M5 en la base inferior. Cabe destacar que las placas apiladas fueron aseguradas a la base con tornillos M4 y separadores M4 de 12 mm entre si. Se

utilizaron tornillos y separadores de plástico para evitar mal contactos con las placas base o los cables. Finalmente la versión final manufacturada se puede ver en la siguiente Figura 27.

Figura 26. Impresión de la base superior

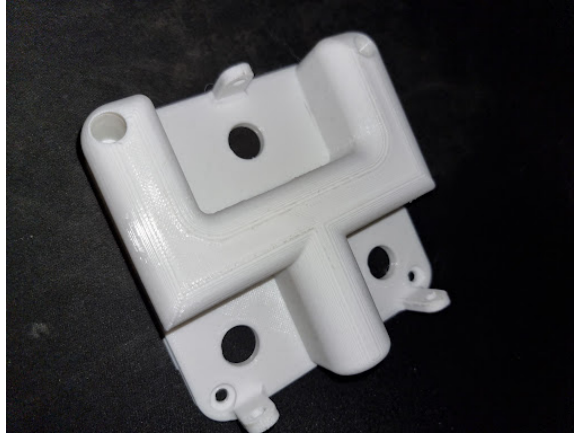
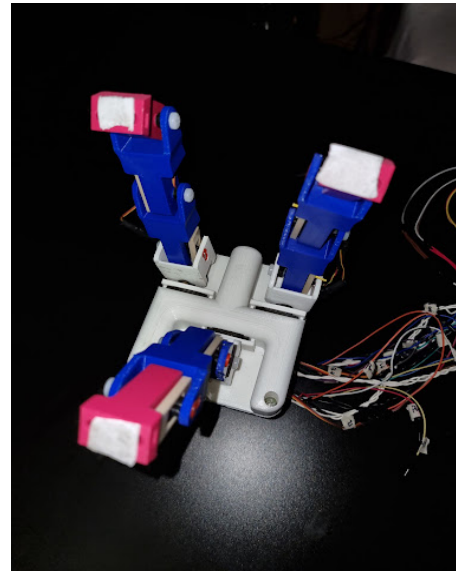


Figura 27. Manufactura final del *gripper*

(a) Vista isométrica.

(b) Vista superior.



7.1.4. Reconocimiento del *gripper* en el ecosistema Robotat

Uno de los objetivos específicos de este trabajo es garantizar el reconocimiento del *gripper*: dentro del ecosistema Robotat de la Universidad del Valle [3]. Por esta razón, el *gripper*: fue diseñado en una configuración no planar y con múltiples dedos, y en cada punta de estos dedos se colocaron pequeñas esferas de material retroreflectante que son utilizadas por el sistema de captura de movimiento Optitrack [23].

Para comprobar el reconocimiento del *gripper*: fueron establecidos como objetivos de

reconocimiento las puntas de cada uno de sus dedos y se brindaron diferentes posiciones y orientaciones al *gripper*: durante una trayectoria dentro del Robotat. En la Figura 28 se puede observar como fue ubicado el *gripper*: para el reconocimiento.

La trayectoria recorrió un gran porcentaje de la totalidad del Robotat y cubrió los puntos mas importantes del área de trabajo del manipulador serial R17. Para verificar el reconocimiento, se grabó un vídeo con el punto de vista de el *gripper*: durante la trayectoria, al mismo tiempo que se realizó una grabación de los objetivos a través del software Motive. Esto permitió realizar una comparativa entre la la posición y orientación física de cada uno de los dedos y las capturadas por el sistema. En la Figura 29, se pueden visualizar tres poses diferentes, en distintas ubicaciones del Robotat, que representan tres orientaciones importantes en las que el *gripper*: debe ser reconocido: hacia arriba (perpendicular al piso), hacia a un lado (rotado 90 grados en cualquier eje, excepto el perpendicular al piso) y boca abajo. Estas poses son poses naturales en las que el *gripper*: manipulará objetos, por lo que es primordial que sea reconocido en ellas.

Se obtuvieron resultados exitosos en la comparación de las dos perspectivas a lo largo de la trayectoria, lo que demuestra que el diseño mecánico del *gripper*: es reconocible dentro del ecosistema Robotat. Cabe mencionar que estas pruebas se realizaron sin el *gripper*: montado en el R17, debido a que no se encontraba instalado en el Robotat.

Figura 28. *Gripper* con esferas retroreflectantes en la punta de los dedos

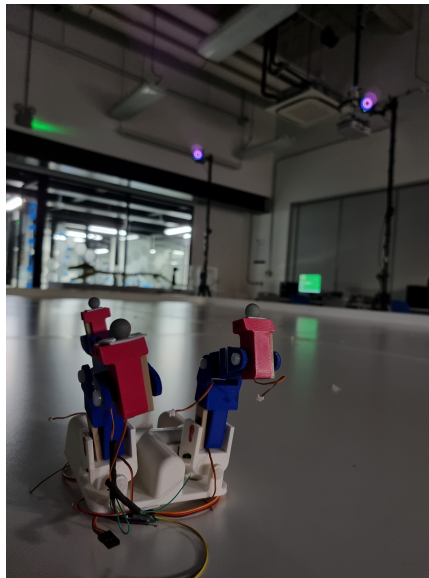
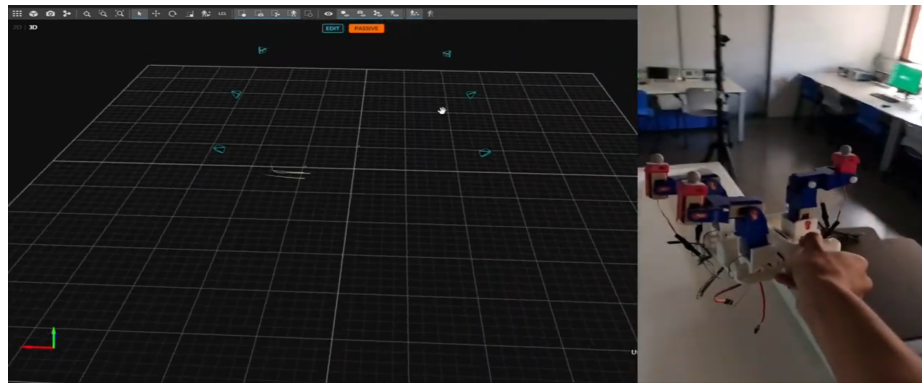
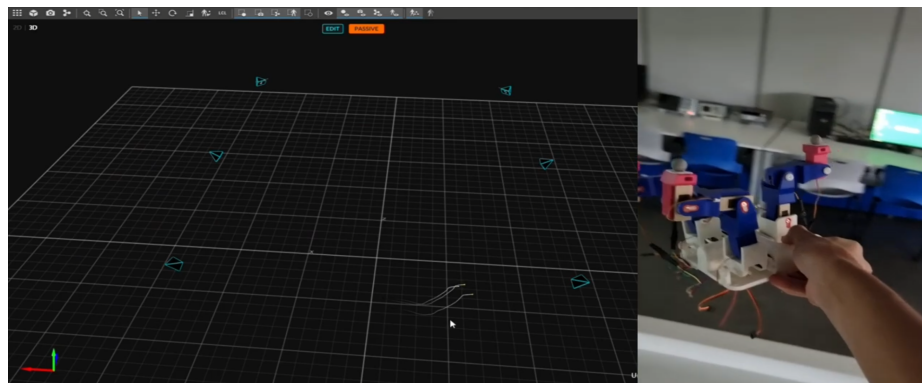


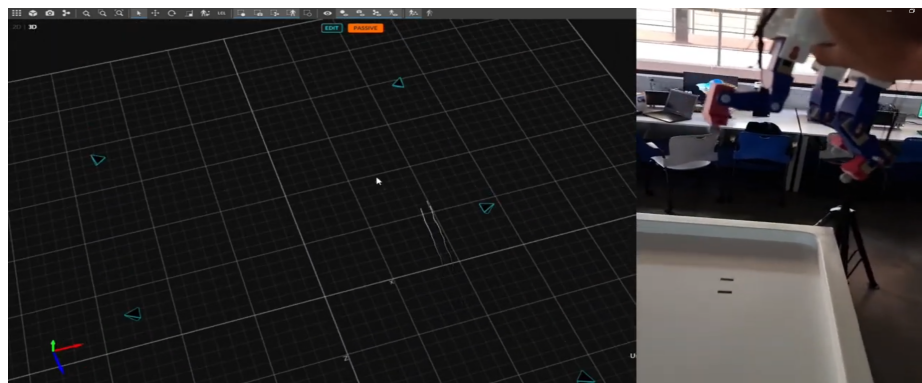
Figura 29. Poses utilizadas en la prueba de reconocimiento del *gripper* en el ecosistema Robotat



(a) Orientación hacia arriba.



(b) Orientación acostada.



(c) Orientación hacia abajo.

7.2. Diseño y evaluación del circuito de medición de corriente

Uno de los objetivos específicos de este trabajo, busca una forma de estimar, sensar o conocer la fuerza que el *gripper*: ejerce para realizar un control de fuerza, por esto se realizó un circuito de medición de corriente. La forma como se solucionó este problema fue encontrando la fuerza ejercida por medio de la corriente de consumo de cada servomotor, basándose en que, con un valor de corriente y la constante de torque específica del motor, se puede obtener el torque que este está realizando (dado que la corriente es proporcional al valor de torque en un motor). Por lo que realizar un circuito que nos brinde el consumo de corriente de cada uno de los motores del nos ayudara a estimar el torque que cada uno de estos realiza. Con estos valores de torque, es posible estimar la fuerza vectorial que se ejerce en el efector final utilizando el jacobiano inverso del dedo y el torque resultante de los motores, como se puede ver en la ecuación 8.

$$\tau = J^T * F \quad (8)$$

7.2.1. Diseño del circuito

Según [28], existen 4 formas de medición de corriente basadas en amplificadores:

- Amplificadores operacionales.
- Amplificadores de instrumentación.
- Amplificadores diferenciales.
- Amplificador medidor de corriente.

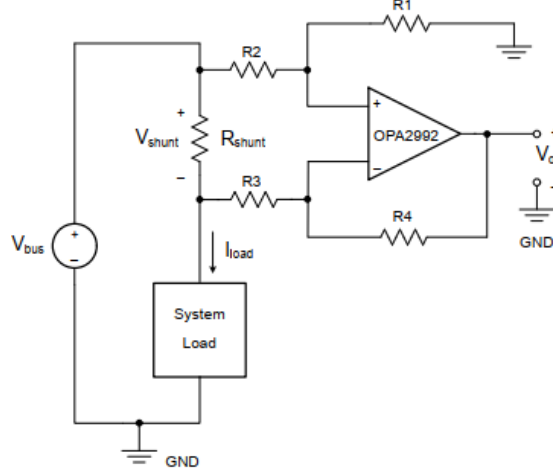
Para la realización de este proyecto se emplearon amplificadores operacionales en una configuración diferencial. Esta elección se debe a la gran cantidad de amplificadores necesarios para la medición. En resumen serían por lo menos 12 circuitos de medición de corriente, debido a que se tiene 4 servomotores por dedo y 3 dedos en total. Al seleccionar amplificadores más sofisticados como los de instrumentación o medidores de corriente el costo del proyecto se elevaría muy significativamente. Por lo que el amplificador operacional en dicha configuración fue la selección adecuada para la medición.

La medición de corrientes con amplificadores operacionales puede ser de 2 maneras:

- *High-side sensing*, que tiene como ventajas no crear interferencia con la tierra del sistema, el poder monitorear la corriente directamente desde la fuente y el tener la capacidad de detectar cortos. Como desventaja tiene que se requiere un amplificador que posea un amplio rango de voltaje de entrada común (V_{cm}).
- *Low-side sensing*, tiene como ventajas que el V_{cm} sea aproximadamente 0 y como desventajas que no pueden detectar cortos, la medición es unilateral y la tierra del sistema puede ser bastante afectada debido a impedancias.

Como resultado de esta comparación se decidió emplear un circuito *High-side sensing*, para el cual la arquitectura presentó la siguiente forma.

Figura 30. Circuito High-Side sensing [29]



En la Figura 30, se puede observar que básicamente el circuito constaba de un res-tador amplificador, midiendo el voltaje entre 2 extremos de una resistancia shunt ubicada antes de la carga y utilizando ley de Ohm para estimar la corriente que utiliza el servomotor.

Se tomó el documento [30] como referencia para el proceso de diseño de este circuito. Lo primero que se fijó fue la corriente máxima medible por el circuito. Fue fijada a 0.5A, ya que al realizar las pruebas en 32, se observó en la fuente de voltaje que la corriente no pasaba de 0.4A. Para proteger al sistema se sobre-dimensionó a dicha corriente máxima. Posteriormente se fijó en 175mV el voltaje máximo en la resistencia shunt. El documento [30] sugiere la siguiente relación para calcular qué resistencia shunt utilizar:

$$R_{Shunt} = \frac{V_{MaxShunt}}{I_{Max}} = \frac{175mV}{0.55A} = 0.3181\Omega. \quad (9)$$

Sin embargo, la resistencia shunt que se utilizó fue de 0.33 Ω debido a que era la estándar más cercana. El tener un valor pequeño de la resistencia shunt ayuda a que no existan pérdidas grandes de corriente, esto es importante en el trabajo debido a que las corrientes que se planean medir son bastante pequeñas, por lo que si se tienen pérdidas el error en la medición podría ser considerable.

Como fue mencionado anteriormente el circuito mide un voltaje pequeño, por lo que para que fuese medible en un microcontrolador debía de entrar en un rango aproximado de 0.1v a 5v. De igual manera, las corrientes que se esperan medir van desde 0.5 A a 10mA. Para calcular cuál es la ganancia necesaria para que se cumpla el rango de voltaje mencionado anteriormente, el documento [30] muestra la siguiente ecuación:

$$Gain = \frac{V_{oMax} - V_{oMin}}{(I_{Max} - I_{Min}) * R_{Shunt}} = \frac{5 - 0.15}{(0.55A - 0.06A) * 0.33\Omega} = 29.99 \approx 30 \frac{V}{V}. \quad (10)$$

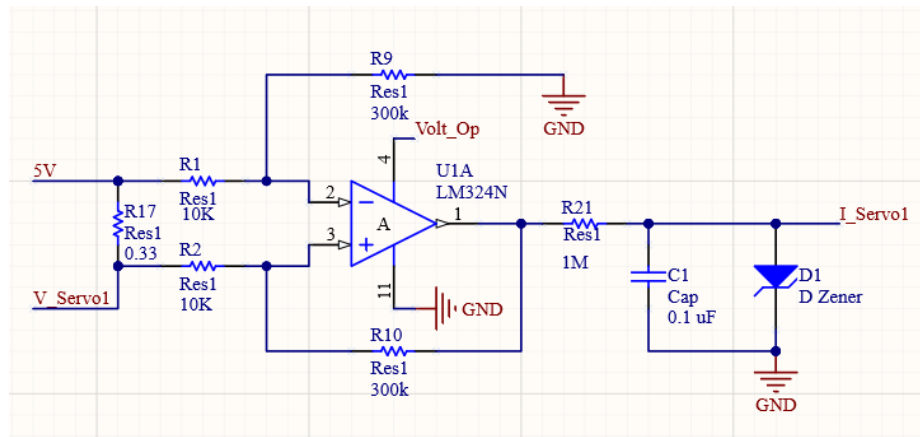
Debido a que la ganancia es $Gain = \frac{R4}{R3}$, se fijó la resistencia 3 a 10K Ω , obteniendo una resistencia 5 de 300K Ω . Para la elección del amplificador operacional, según[29], es reco-

mendable utilizar amplificadores operacionales (OpAmps) con un bajo voltaje de desfase, debido a que el voltaje de salida aumenta mientras mayor sea este parámetro. Además de esto, se debe de considerar que el VCM del amplificador requerido depende de la ganancia del circuito de medición. En este trabajo se tiene una ganancia alta, por lo que es necesario que el V_{cm} pueda llegar a valores cercanos al voltaje de alimentación del circuito. Se utilizaron OpAmps LM324, debido a que ofrecen voltaje de desfase de $\pm 2mV$, el cual no era considerablemente alto. Aparte de esto posee un VCM de $0aV_{cc} - 1.5V$, lo cual también cumple en este caso. Además de esto, éste integrado contiene 4 amplificadores por lo que facilitó y compactó la fabricación de la PCB: y mejorará el orden de la circuitería del *gripper*.

Al realizar una medición de corriente en 32, la señal de voltaje de salida presentó un poco de ruido, por lo que se implemento en la salida del circuito un filtro RC pasa-bajas, con una frecuencia de corte de 1.59 Hz.

Finalmente, se colocó en el circuito un diodo zener de 5.1V en una configuración clipper (limitador), con el objetivo de proteger al microcontrolador al momento de realizar alguna lectura, si el voltaje o la corriente es superior a la seleccionada en el diseño. El circuito final de medición fue el siguiente:

Figura 31. Circuito de medición de corriente realizado



7.2.2. Evaluación del circuito

Para evaluar el correcto funcionamiento del circuito se realizó una lectura de corriente de un servomotor con un prototipo del circuito en protoboard. La metodología para esta evaluación se realizó alimentando uno de los servomotores del ensamble del dedo realizado en: 25, por medio de de las fuentes de voltaje de la Universidad del Valle, y dándole una posición fija desde un microcontrolador. Posteriormente se aplicó una fuerza perpendicular al eslabón, con el dedo. Lógicamente, para permanecer en dicha posición, el motor aumentaba su corriente. El objetivo fue observar este cambio de corriente en la salida del circuito por medio de un osciloscopio y compararlo con el indicador de consumo de corriente que tiene la fuente de voltaje.

En la primera evaluación del circuito no se tenía el filtro pasa-bajas, por lo que la señal de salida presentaba bastante ruido. Al integrar dicho filtro se pudo observar correctamente

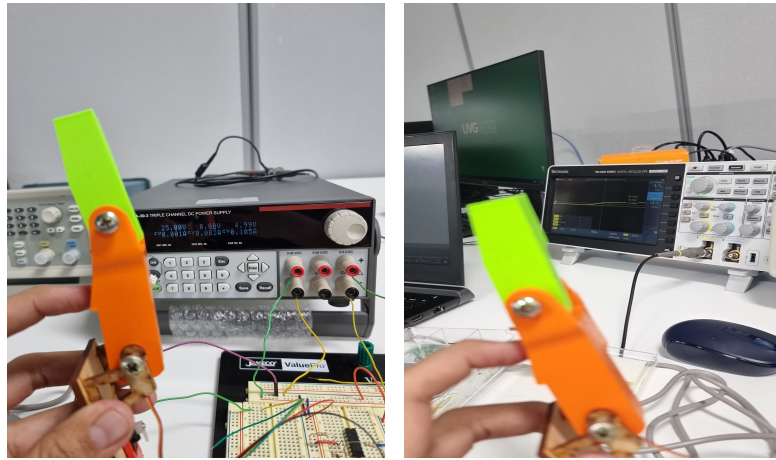
el cambio del voltaje conforme se aumentaba o disminuía el consumo de corriente del servomotor, incluso en corrientes mas pequeñas. El único problema fue que después de cierto tiempo de lectura, el capacitor del filtro RC se cargaba y ya no generaba una lectura tan precisa como anteriormente lo hacia. Por lo tanto, fue necesario rediseñar el filtro pasa-bajas para que utilizara un capacitor más pequeño ($0.1 \mu F$) y este tardara menos tiempo en descargarse. Al realizar esto, el circuito mejoro su lectura, ya que la salida de voltaje no se veía afectada por el capacitor cargado. Cabe mencionar que el rango de voltajes se encontraban dentro de lo esperado, 0.1v a 5v y al emplear la función:

$$I_{in} = \frac{V_o * R2}{R_{shunt} * R1} \quad (11)$$

Se obtiene la corriente que consume el servomotor. En esta primera evaluación del circuito, al comparar con la corriente que desplegaba la fuente de voltaje se obtuvieron porcentajes de error aproximados a 3.6 %

Figura 32. Evaluación del funcionamiento del circuito

(a) Lectura de corriente en fuente de alimentación. (b) Lectura de corriente del circuito en osciloscopio.



Después de verificar el correcto funcionamiento del circuito, se fabricó en una placa de circuito impreso (PCB:), como se muestra en la sección 7.2.3. Utilizando el circuito manufacturado y el microcontrolador para leer el voltaje de la salida del circuito, se llevó a cabo la evaluación final del funcionamiento del mismo. Se aplicaron diferentes pesos a los servomotores, previamente establecidos, con el fin de comparar la corriente medida por el microcontrolador y el circuito manufacturado, y el indicador de consumo de corriente, como se explicó anteriormente. La aplicación de estos pesos aseguró lecturas de corriente constantes, ya que la fuerza aplicada a los servomotores estaba controlada y mantenida constante. Los resultados se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Resultados de comparativa de consumo de corriente de los servomotores con diferentes fuerzas

Lectura	Peso (gr)	Peso (lb)	Corriente de fuente (A)	Corriente promedio medida (A)	Porcentaje de error
1	86.0000	0.1896	0.0120	0.0105	12.863 %
2	116.2000	0.2561	0.0470	0.0487	3.662 %
3	146.4000	0.3228	0.0550	0.0522	5.175 %
4	168.4000	0.3713	0.0630	0.0654	3.753 %

Como se puede observar en el Cuadro 1, el porcentaje de error es significativamente mayor en comparación con las otras mediciones cuando la corriente de consumo, y por ende la fuerza aplicada, es menor. El circuito muestra mejores resultados midiendo la fuerza cuando esta es ligeramente mayor a 100 gramos, aumentando el porcentaje de error en fuerzas menores. Sin embargo, esto no representa un problema importante para el *gripper*., ya que 100 gramos equivalen a menos de 0.22 libras, y estas fuerzas podrían no ser críticas en la perspectiva de manipulación de objetos. En las mediciones 2, 3 y 4, los porcentajes de error son muy parecidos, en un rango de 3.6V a 5.2V de porcentaje de error. Estos valores de porcentaje de error son aceptables, demostrando que el circuito realiza una buena lectura de corriente.

Cabe mencionar que esta prueba fue útil para encontrar la constante de torque de los servomotores como se puede ver en 2. En la sección de anexos se pueden encontrar los enlaces a los vídeos donde se realizaron las pruebas de lectura.

7.2.3. Fabricación y ensamblaje de las *PCB*

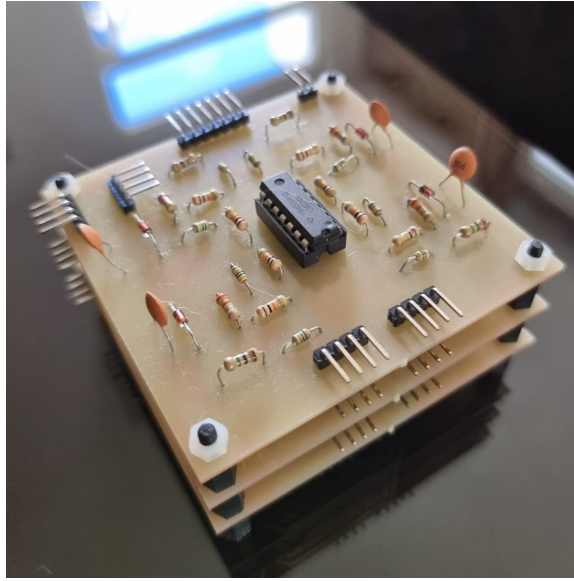
Por medio del software Altium Designer se diseñó la *PCB*:. Como son necesitados 12 circuitos de medición de corriente, se utilizaron 3 amplificadores operacionales LM324 en total, uno por cada placa. Cada placa entonces se encarga de la medición y alimentación de cada uno de los dedos que componen al *gripper*:. A cada una de las placas se le brindó 7 pines de tierra, un pin de alimentación para el op amp (30V), otro para la alimentación de los servomotores (5V), salidas de alimentación observada por el circuito para cada uno de los servomotores y el voltaje de salida del circuito para la lectura de corriente.

Así mismo en un sector de la placa se le fueron agregados 8 pines únicamente para mantener el orden en la conexión de la señal de control de los servomotores. En la placa dicho segmento consta de 4 pines conectados a sus respectivos 4 en donde en un extremo se conecta el cable de control del servomotor y del otro extremo el pin PWM del arduino en donde se envía la señal de control.

Debido al numero elevado de placas se decidió emplear la técnica de stackeo de placas. Esta técnica consta en apilar las placas verticalmente e interconectar los elementos en común, como la tierra y voltajes de alimentación. Al fabricar las placas se realizaron agujeros de 5mm para poder emplear separadores plásticos de 12mm de altura. Estos 12 mm de altura son suficientes para que las placas no hagan un contacto indeseado entre si y permitan al mismo tiempo tener las placas montadas en un espacio compacto.

Las placas fabricadas tienen dimensiones de 75x75 mm. Y el ensamblaje de las placas se puede observar en la Figura 33.

Figura 33. PCB:s stackeadas del *gripper* ensambladas



7.2.4. Estimación del torque de los servomotores

A principios del capítulo fue mencionada la forma en como se estimara la fuerza aplicada del *gripper*. Y esta es por medio de la ecuación 8. Se estimara la fuerza aplicada por medio de la cinemática del *gripper*: y los torques vectoriales que son aplicados por los servomotores. Estos torques vectoriales son estimados en cada uno de los servomotores por medio de la relación entre la constante de torque del servomotor y la corriente de consumo, como se puede ver en la ecuación 12.

$$\tau = I_{consumo} * K_{torque} \quad (12)$$

Muchos servomotores comerciales emplean *drivers* para medir el torque ejercido, la corriente, la temperatura, etc. Asimismo, cuentan con documentación de numerosos parámetros del motor, entre ellos la constante de torque. Sin embargo, en este trabajo no se utilizaron *drivers*, y además los servomotores Traxxas 6348 empleados no incluían dicha documentación, ni fue posible encontrar este valor en internet. Por lo tanto, se procedió a obtener experimentalmente la constante de torque del motor.

Se acopló al servomotor un radio de 6 cm al cual se ataron diferentes pesos. Utilizando el circuito de medición de corriente, se realizaron mediciones aproximadamente cada 50 ms durante un lapso de 20 segundos. Con estos datos se aplicó un filtrado para minimizar el ruido y, posteriormente, se obtuvo el promedio de corriente medida.

Cuadro 2. Resultados del calculo de constante de torque de servomotor Traxxas 6348 empleado en el *gripper*

Lectura	Peso (gr)	Peso (lb)	Fuerza (N)	Torque (Nm)	Corriente (mA)	Corriente (A)
1	86.0000	0.1896	0.8434	0.0506	10.4564	0.0104
2	116.2000	0.2561	1.1395	0.0684	48.7212	0.0487
3	146.4000	0.3228	1.4357	0.0861	52.1536	0.0522
4	168.4000	0.3713	1.6514	0.0991	65.3646	0.0654
Regresión Lineal				0.833277		

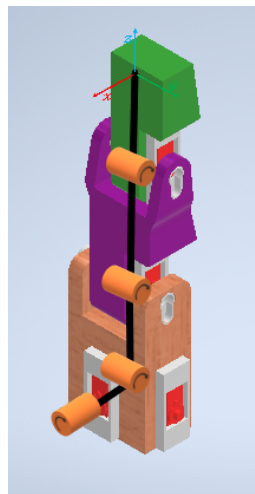
Como se observa en el Cuadro 2, se realizaron mediciones con cuatro pesos diferentes, desde 86 g hasta 168.4 g. Luego se calcularon la fuerza y el torque que estos pesos ejercían sobre el acople. Es importante señalar que los pesos fueron seleccionados con el objetivo de no sobrecargar los servomotores hasta el punto de dañarlos o provocar deslizamiento. Conociendo la corriente promedio y el torque de cada peso, se realizó una regresión lineal de estos valores, obteniendo como resultado el coeficiente de torque del servomotor Traxxas 6348, cuyo valor es 0.833277.

Cinemática de los dedos del *gripper* como manipuladores

El mecanismo del *gripper*: fue analizado desde la perspectiva de cinemática de cuerpos rígidos, en donde cada uno de los dedos representa un manipulador serial, gracias a que son cadenas abiertas que pueden separarse del eslabón entendiéndose la base. Esta base no posee ningún movimiento por lo que actúa como fija para los dedos.

Un dedo de este *gripper*: está compuesto por 4 revolutas, de las cuales 3 de ellas corresponden a la flexión del dedo, es decir, las 3 revolutas apuntan hacia el mismo plano, unen a cada uno de los eslabones o falanges y se encargan del movimiento del mismo. La otra revoluta se encarga de rotar el dedo perpendicularmente a las juntas anteriores, permitiendo que el dedo pueda moverse en 3 dimensiones. El modelo del dedo se puede ver en la Figura 34.

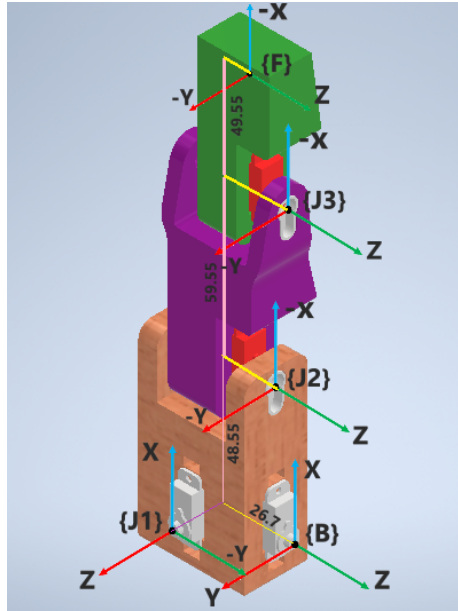
Figura 34. Modelo de las juntas del dedo



8.1. Matriz de parámetros Denavit-Hartenberg del dedo

Se empleó la convención Denavit-Hartenberg 6.5, para obtener la cinemática directa del dedo. El análisis del dedo se realizó por medio de Matlab. previo a este análisis se realizó un diagrama del dedo, Figura 35, para ubicar las juntas.

Figura 35. Diagrama con parámetros DH del dedo



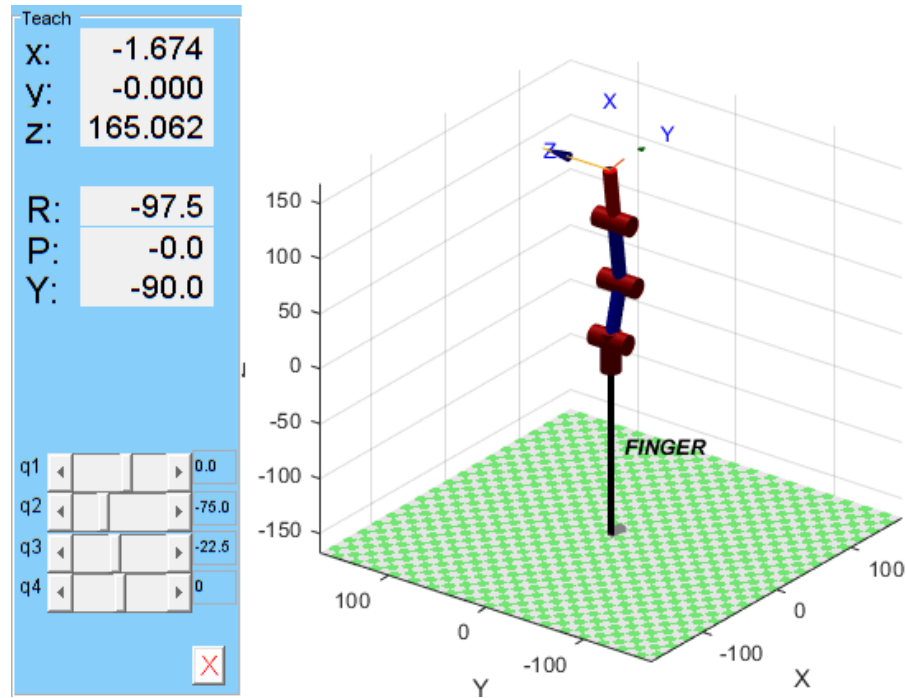
Después se realizó en Matlab una librería que contuviera la matriz Denavit-Hartenberg para obtener la cinemática directa, utilizando los parámetros del modelo. Estos parámetros fueron los siguientes:

Figura 36. Parámetros Denavit-Hartenberg del dedo

```
function T = FingerFK(q)
    DH = [ q(1)      ,    20.00,    0.00,   -pi/2;
           q(2) + pi,    0.00,   -48.55,    0.00;
           q(3) + pi,    0.00,    59.55,    0.00;
           q(4)      ,    0.10915,   49.55,    0.00];
    T = getFK(DH);
end
```

Por medio de la Robotics Toolbox de Peter Corke [31], se creó un modelo SerialLink del dedo, con los parámetros de la Figura 36 con el motivo de verificar que el diseño estuviera correcto. La simulación del modelo se puede observar en la Figura 37 y como se puede observar la creación del modelo y los parámetros fueron correctos.

Figura 37. Modelo SerialLink del dedo

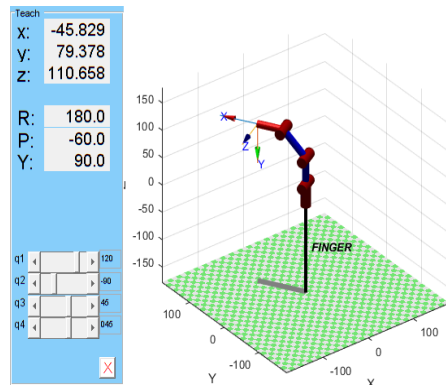


8.2. Cinemática directa de dedo

Se utilizó la librería del capítulo anterior, la cual se puede encontrar en el capítulo de anexos 12.1, para obtener la cinemática directa 6.4 del dedo. En dicha función se ingresa un vector de configuración y esta devuelve la pose final del efector final del dedo. Para comprobar que la cinemática directa se realizó de forma correcta, se empleó la función `teach` de la Robotics Toolbox de Peter Corke. Dicha función tiene capacidad de mover el dedo según la configuración que sea ingresada, lo que permitió una comparación de posición en el efector final para ambos métodos. Se creó un vector configuración $q1 = [2\pi/3, -\pi/4, \pi/4, \pi/4]$ y se ingresó tanto en la función de cinemática directa como en la función `teach`. Los resultados, como se pueden observar en la Figura 38, fueron iguales.

Figura 38. Comparación de pose obtenida mediante cinemática directa

(a) Pose de efector final desde la función teach.



(b) Pose de efector final desde la función creada.

1	2	3	4
-0.5000	-1.9429e-16	-0.8660	-45.9236
0.8660	2.2204e-16	-0.5000	79.3238
2.2204e-16	-1	6.1232e-17	110.6582
0	0	0	1

8.3. Jacobiano

Se realizó la obtención del jacobiano 6.6 del modelo del dedo por medio de Matlab. Se usó una librería para el cálculo del jacobiano por medio de iteración y una matriz antisimétrica, como se presenta en el documento [15]. Para comprobar el cálculo del jacobiano, se utilizó el mismo vector de configuración que en la cinemática directa. El jacobiano obtenido para el modelo fue el siguiente:

Figura 39. Jacobiano obtenido con vector de configuración de prueba

1	2	3	4
-79.3235	-45.3289	-21.0539	1.2387e-04
-45.9240	78.5119	36.4664	-2.1456e-04
0	-91.6587	-91.6584	-49.5500
8.2026e-17	-0.8660	-0.8660	-0.8660
1.3877e-12	-0.5000	-0.5000	-0.5000
1.0000	1.8463e-12	-5.5744e-13	-5.5744e-13

8.4. Cinemática inversa del manipulador

Para calcular la cinemática inversa 6.7 del modelo se empleó la librería anterior para el cálculo del jacobiano y una librería adicional que genera una serie de configuraciones necesarias para obtener una pose final desde una posición inicial. Para la comprobación de la cinemática se utilizó una configuración inicial de 0, como si el dedo iniciara del reposo.

Se aplicó, como primera prueba, cinemática inversa únicamente de posición para realizar la trayectoria. Se utilizaron 3 diferentes métodos para obtener el jacobiano inverso, con una tolerancia de $1e - 4$:

1. El método Levenberg-Marquadt
2. El método de pseudo-inversa
3. El método de transpuesta

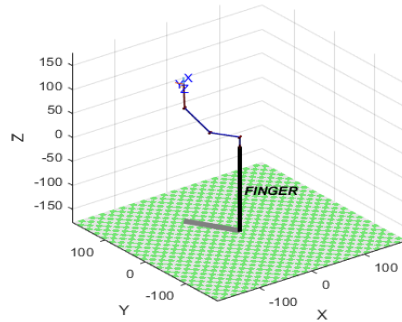
De estos tres métodos uno fracasó y dos fueron exitosos. Levenberg-Marquadt no logró converger a una configuración. De los dos métodos que sí convergieron a la posición correcta, el que lo hizo más rápido fue el de la pseudo-inversa, sin embargo, como se puede ver en la Figura 41a, los valores a los que converge son demasiado elevados. Al ser en función de grados, lo que intentará realizar el dedo al darle esa configuración será dar muchas vueltas, en las juntas donde contenga un valor alto, hasta que llegue a ese valor en radianes. La solución simple a esto es encontrar el valor de ángulo al que equivale dentro del rango de 0 a 2π .

Figura 40. Pose final generada por cinemática inversa orientada en posición con diferentes métodos de obtención del jacobiano inverso

(a) Pose final con Pseudoinversa.

(b) [Pose final con Pseudoinversa.

Pose generada por configuración obtenida en cinemática inversa (Pseudoinversa)



Pose generada por configuración obtenida en cinemática inversa (Traspuesta)

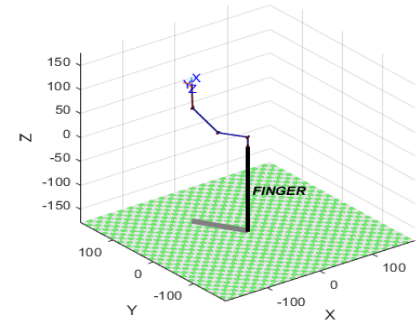
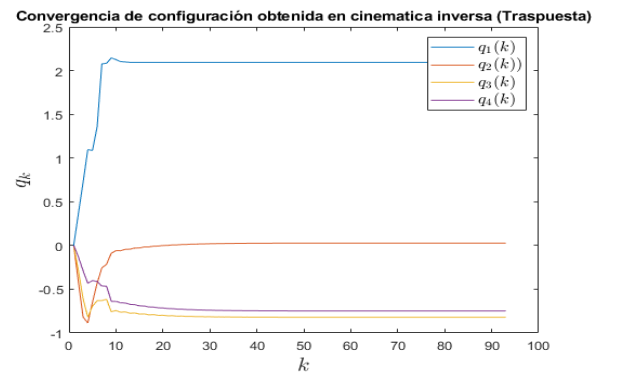
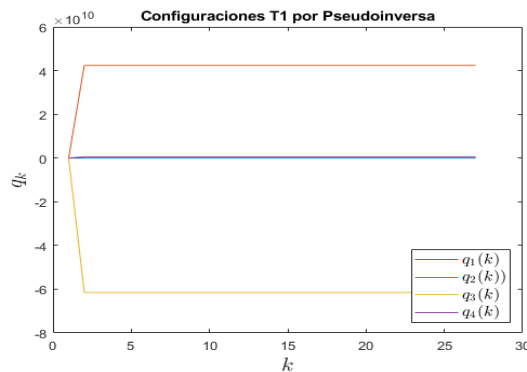


Figura 41. Convergencia de configuraciones de cinemática inversa orientada en posición con diferentes métodos de obtención del jacobiano inverso

(a) Convergencia de configuración con Pseudoinversa.

(b) Convergencia de configuración con Traspuesta.



El método que funcionó de mejor manera es el de traspuesta, y como se puede ver tanto en las Figuras 40 y 41, tarda alrededor de 90 iteraciones en llegar a converger con una tolerancia de $1e-4$, y llega a una posición aceptable desde la iteración 30 aproximadamente.

En las pruebas de cinemática inversa tomando en cuenta simultáneamente la orientación y la posición del efector final, intentando alcanzar exactamente la misma pose, el método Levenberg-Marquardt sí logró converger y lo hace de una excelente manera. Las métricas con las que se trabajó en la cinemática inversa fueron tolerancias de error de posición de $1e-06$ y tolerancia de error de orientación de $1e-05$ y un máximo de iteraciones de 500.

Figura 42. Pose del modelo con la configuración obtenida de Levenberg-Marquardt, tomando en cuenta orientación

Pose generada por configuración obtenida en cinemática inversa con orientación (Levenberg-Marquardt)

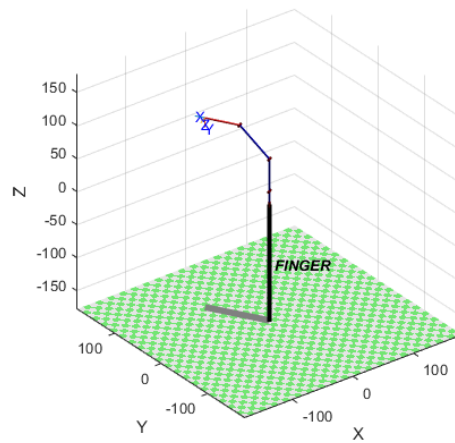


Figura 43. Convergencia de configuración, realizada por Levenberg-Marquardt, tomando en cuenta orientación

Convergencia de configuración obtenida en cinemática inversa con orientación (Levenberg-Marquardt)

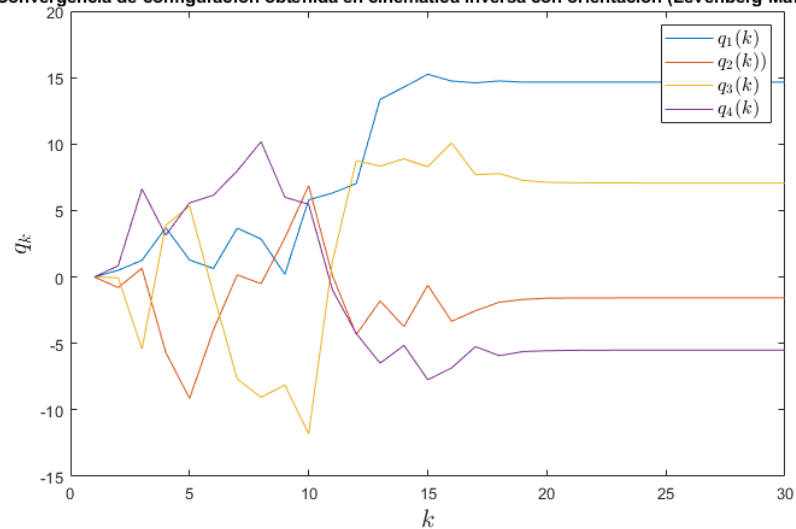
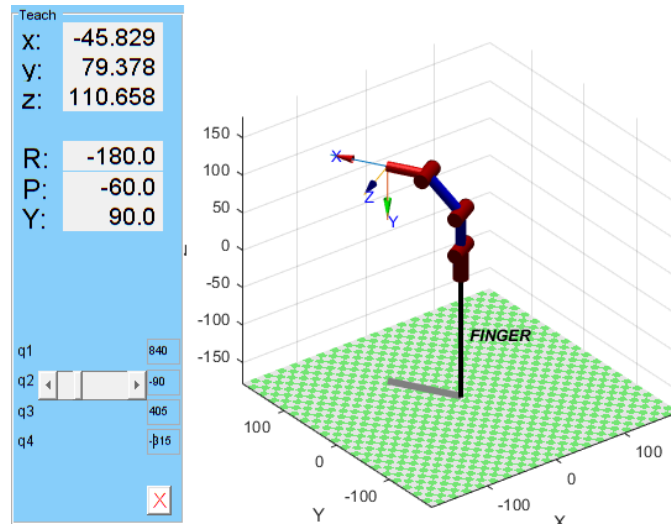


Figura 44. Pose final resultante de la configuración de cinemática inversa en la función `teach`



En la comparación de ambas poses de cinemática directa y cinemática inversa, Figuras 38a y 44, se puede ver que ambas tienen la misma pose, por lo que se concluye que la cinemática completa del dedo del *gripper*., está realizada correctamente.

8.4.1. Cinemática implementada en el microcontrolador

Debido al sistema de estimación empleado en este trabajo, fue indispensable realizar un cálculo constante del jacobiano inverso y, por ende, de la cinemática de cada uno de los dedos del *gripper*.. Por esta razón, se buscó efectuar este cálculo de manera continua en el microcontrolador. Sin embargo, en este trabajo de graduación se utilizó un microcontrolador Arduino MEGA para llevar a cabo este cálculo, y los métodos para el cálculo de la cinemática mencionados anteriormente resultaron muy complejos en términos computacionales para el mismo. Por ello, se decidió migrar este cálculo de cinemática a expresiones simbólicas.

Trabajar en variables simbólicas nos permitió resolver el problema de cinemática de manera general, de esta forma, es posible aplicar el mismo cálculo únicamente cambiando los valores de entrada de la expresión sin necesidad de resolver el problema de cinemática nuevamente. Esto ayuda a aumentar la precisión y eficiencia de los cálculos. Y reducir el problema de cinemática en operaciones computacionales simples.

Se realizó una función encargada de hacer el cálculo numérico de la fuerza en el efector final por medio de la librería *Matlab Function*, Figura45a. Y finalmente esta función fue adaptada a la sintaxis del software del microcontrolador, en este caso a Lenguaje C, Figura45b.

Figura 45. Funciones empleadas para generar el cálculo numérico de la estimación de fuerza en el efector final

(a) Función empleada en Matlab.

```
function F = ef_force(q1,q2,q3,q4,taul,tau2,tau3,tau4)
%EF_FORCE
%    F = EF_FORCE(Q1,Q2,Q3,Q4,TAU1,TAU2,TAU3,TAU4)
```

(b) Función emigrada a lenguaje C.

```
#include "ef_force.h"

static double t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8, t9,
static double et1, et2, et3, et4, et5, et6, et7,

void
ef_force_calc(double q1, double q2, double q3, do
{
```

1. Se desarrolló un *gripper*: no planar versátil para el brazo robótico R17 de 3 dedos con 12 grados de libertad utilizando impresión 3D y nano servomotores Traxxas 6348 y servomotores MG90s en sus juntas.
2. Se diseñó un *gripper*: capaz de manipular múltiples objetos de diferentes geometrías y tamaños.
3. Se implementó un sistema electrónico capaz de estimar la fuerza que aplica el *gripper*: en tareas de manipulación del robot R17. La fuerza fue estimada por medio de la relación entre el jacobiano inverso de cada dedo y el torque resultante de los servomotores que lo componen.
4. Se obtuvo un diseño mecánico reconocible, en la mayoría de sus posiciones y orientaciones, por el sistema de captura de movimiento OptiTrack en el ecosistema Robotat de la Universidad del Valle de Guatemala.
5. El método seleccionado a emplear para el cálculo del jacobiano inverso en la cinemática inversa de posición usando simbólicos fue el de pseudo-inversa debido a que el cálculo computacional por este método es más óptimo y fue el que presentó el mejor comportamiento.
6. La herramienta de medición de corriente y estimación de torque genera resultados satisfactorios, como se pudieron observar en los resultados, obteniendo porcentajes de error menores a 5.17 % en el rango funcional, y es una herramienta implementable para proyectos en los que se requiera controlar o conocer la fuerza de juntas actuadas por motores y dichos motores no proporcionen esta información.

CAPÍTULO 10

Recomendaciones

1. Se recomienda probar otros tipos de amplificadores para el circuito de medición de corriente de los servomotores, por ejemplo de instrumentación o sensores capaces de medir la corriente por efecto Hall.
2. Se recomienda encontrar una mejor alternativa a los tornillos como ejes de soporte en las juntas de los dedos del *gripper*.
3. Experimentar y verificar si los otros métodos de obtención del jacobiano inverso en simbólicos presentan mejores resultados , que los obtenidos con pseudo-inversa.
4. Hacer pruebas de manipulación de objetos con el *gripper*: tomando en cuenta información que brinde el sistema optitrack, por ejemplo: ubicación de obstáculos, tamaño, ubicación y forma de diferentes objetivos a manipular, pose del efector final respecto al marco inercial del optitrack, etc.

-
- [1] R. A. S. Duarte, «Diseño de gripper para robot serial R17 controlado de manera inalámbrica,» Tesis de mtría., Universidad del Valle de Guatemala, 2021.
 - [2] J. Castañeda, «Diseño e implementación de una red de comunicación wifi e interfaz gráfica para una mesa de pruebas de robótica de enjambre,» Tesis de mtría., Universidad del Valle de Guatemala, 2020.
 - [3] C. Perafan, «Robotat: Un Ecosistema Robótico de Captura de Movimiento y Comunicación Inalámbrica,» Tesis de mtría., Universidad del Valle de Guatemala, 2021.
 - [4] Y.-J. Kim, H. Song y C.-Y. 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.
 - [5] H. Khamis, B. Xia y S. J. Redmond, «A novel optical 3D force and displacement sensor – Towards instrumenting the PapillArray tactile sensor,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 291, págs. 174-187, 2019, ISSN: 0924-4247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.03.051>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424718319794>.
 - [6] R. Brookhuis, T. Lammerink, R. Wiegerink, M. de Boer y M. Elwenspoek, «3D force sensor for biomechanical applications,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 182, págs. 28-33, 2012, ISSN: 0924-4247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.04.035>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424712002749>.
 - [7] J. D. P. Orellana, «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,» Tesis de mtría., Universidad del Valle de Guatemala, 2021.
 - [8] A. for Advancing Automation. «What is an End Effector and How Do You Use One?» (2020), dirección: <https://www.automate.org/news/what-is-an-end-effector-and-how-do-you-use-one> (visitado 05-08-2022).

- [9] K. T. Co. «8 Types of End of Arm Tooling Devices for Automation Projects.» (2018), dirección: <https://www.kellertechnology.com/blog/8-types-of-end-of-arm-tooling-devices-for-automation-projects/> (visitado 05-08-2022).
- [10] P. Corke, *Robotics, vision and control fundamental algorithms in MATLAB*, 2nd. Springer International Publishing, 2017.
- [11] R. Norton, *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. Mexico,DF: McGraw Hill, 2013.
- [12] K. M. Lynch y F. C. Park, *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*, 1st. USA: Cambridge University Press, 2017, ISBN: 1107156300.
- [13] M. Zea, (Lección 5) *Cinemática directa de manipuladores seriales en IE3005 - Robótica 1*, Universidad del Valle de Guatemala, ago. de 2021.
- [14] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani y G. O. (auth.), *Robotics: Modelling, Planning and Control* (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing), 1.^a ed. Springer-Verlag London, 2009, ISBN: 9781846286414.
- [15] M. Zea, (Lección 7) *Determinando el Jacobiano de manipuladores seriales en IE3005 - Robótica 1*, Universidad del Valle de Guatemala, sep. de 2021.
- [16] M. Zea, (Lección 9) *Algoritmos de cinemática inversa numérica en IE3005 - Robótica 1*, Universidad del Valle de Guatemala, sep. de 2021.
- [17] C. T. Kiang, A. Spowage y C. K. Yoong, «Review of Control and Sensor System of Flexible manipulator,» *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 77, n.º 1, págs. 187-213, 2014. DOI: 10.1007/s10846-014-0071-4.
- [18] D. E. Seborg, *Process Dynamics and control*, 4th. John Wiley & Sons, 2016.
- [19] A. E.-N. Gene Franklin J.David Powell, *Feedback control of dynamic systems*. United States of America, New Jersey: Pearson Higher Education, 2009.
- [20] P. Kirvan, *What is multithreading?* WhatIs.com, mayo de 2022. dirección: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/multithreading> (visitado 22-11-2022).
- [21] B. Lewis y D. J. Berg, *Pthreads primer : a guide to multithreaded programming*. Sunsoft Press, 1997.
- [22] Qualisys. «Motion Capture for Robotics AUV and UAV.» (2021), dirección: <https://www.qualisys.com/applications/engineering/cybernetics/> (visitado 09-05-2022).
- [23] Optitrack. «OptiTrack for Robotics.» (2021), dirección: <https://optitrack.com/applications/robotics/> (visitado 09-05-2022).
- [24] Trigital. «Mocap, cómo funciona la captura de movimiento y que aplicaciones tiene para la industria.» (2020), dirección: <https://trigital.es/mocap-como-funciona-la-captura-de-movimiento-y-que-aplicaciones-tiene-para-la-industria/> (visitado 09-05-2022).
- [25] *Autodesk Inventor 2022*, Autodesk, 2022.
- [26] C. Traxxas, *Nano servo digital 6348*, Traxxas, abr. de 2013. dirección: <https://traxxas.com/products/parts/6348>.
- [27] B. Ultimaker, *Ultimaker 3*, 2020. dirección: <https://ultimaker.com/es/3d-printers/ultimaker-3>.

- [28] C. Udegbugue e I. Williams, *Current Sensing with Different Types of Amplifiers*, Texas Instruments, 2019.
- [29] T. Claycomb, M. Liu y R. Clifton, *Using An Op Amp for High-Side Current Sensing*, Texas Instruments Incorporated, 2022.
- [30] T. Instruments, *High-side current-sensing circuit design*, Texas Instruments, 2019.
- [31] P. Corke, *Robotics, vision and control* (Springer Tracts in Advanced Robotics), 2.^a ed. Basel, Switzerland: Springer International Publishing, mayo de 2017.

12.1. Repositorio en Github

Todas las funciones y códigos generados para la cinemática del *gripper*: se encuentran en: https://github.com/paullarry2/Gripper__TesisUVG_18117

12.2. Vídeos

12.2.1. Prueba preliminar de medición de corriente de servomotor

En el siguiente vídeo se pueden ver pruebas preliminares de medición de corriente del servomotor por medio de la comparación del voltaje de salida del circuito y la corriente de la fuente de voltaje: <https://youtube.com/shorts/KNo3Q1c9qRk?feature=share>

12.2.2. Prueba de medición de corriente mediante puerto serial

Las pruebas finales de medición de corriente en los servomotores del *gripper*: por medio del puerto serial en Visual Studio se pueden ver en el siguiente vídeo : <https://youtu.be/AR6gjhZt7Yw>

12.2.3. Prueba de reconocimiento del gripper dentro del ecosistema robotat

En el siguiente vídeo se pueden ver las pruebas finales de reconocimiento del *gripper*: en diferentes poses dentro del robotat: <https://youtu.be/4aRMDEbSlss>

12.2.4. Prueba de manipulación de objetos

Las pruebas finales de manipulación de múltiples objetos realizada por el *gripper*: se pueden ver en el siguiente vídeo: <https://youtu.be/pNL47Xw8LA8>

C

CAD: siglas en inglés de diseño asistido por computadora (computer-aided design). Uso de de computadoras para creación, modificación, análisis u optimización de un diseño.
. 22

G

***gripper*:** dispositivo que permite a los robots recoger y sostener objetos, cuando este es acoplado a un manipulador serial, permite la automatización de procesos clave en la industria.. 1–3, 5–9, 11–13, 16, 17, 21–23, 25–31, 33, 35, 37, 38, 40, 46, 48, 49, 53, 54

P

PCB: siglas en inglés de placa de circuito impreso (printed circuit board). Circuito cuyos componentes y conductores se encuentran contenidos dentro de una estructura dinámica.. 21, 25–27, 35–38