

Brazo robótico

Mateo Mendoza Vera
Jorge Andrés Marín
Guillermo Esteban Márquez
Camilo Andres Avilan Payares

Universidad EAN
Facultad de Ingeniería
Diseño Mecatrónica
Bogotá
2024

Resumen

Este documento se enfoca en la creación de un brazo robótico articulado, diseñado principalmente para exposiciones académicas, en este caso para la unidad de estudio Diseño mecatronico. Aborda los problemas de eficiencia y seguridad presentes en diseños anteriores, con el objetivo de mejorar estos aspectos. La metodología implementada abarca desde el diseño inicial hasta el ensamblaje final, haciendo uso de Trello como herramienta para el seguimiento del proyecto. Se destaca por obtener como resultado un brazo robótico rápido, confiable y seguro, adecuado para demostraciones académicas a pequeña escala.

Introducción

En este proyecto se desarrolla un brazo robótico de 4 grados de libertad (DoF) utilizando servomotores, con un diseño tridimensional elaborado en SolidWorks y controlado mediante una tarjeta Arduino. La programación del brazo robótico se realiza en ROS2 (Robot Operating System 2), un marco de trabajo robusto y flexible que permite la simulación y control de sistemas robóticos.

Objetivo General

Diseñar, construir y programar un brazo robótico que sea capaz de realizar tareas de manipulación y agarre de objetos en un entorno simulado y real. Para lograr esto, se emplean herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) como solidworks para modelar cada componente del brazo, servomotores para el movimiento preciso de las articulaciones, y una tarjeta Arduino para el control y la comunicación con el software de ROS2. La simulación en ROS2 permite probar y validar los algoritmos de control y las trayectorias del brazo antes de implementarlos en el hardware real. Esta metodología reduce el riesgo de errores y daños en el prototipo físico, además de facilitar la optimización de los parámetros del sistema.

Objetivos Específicos

- Crear un modelo detallado del brazo robótico en SolidWorks, incluyendo eslabones, juntas y el mecanismo de la pinza.
- Desarrollar y programar los algoritmos de cinemática directa e inversa para controlar el movimiento del brazo.
- Implementar el modelo del brazo en un entorno de simulación utilizando ROS2, y probar las capacidades de manipulación y agarre.

- Imprimir en 3D las piezas del brazo robótico, ensamblar el hardware y conectar los servomotores a la tarjeta Arduino.
- Programar la tarjeta Arduino para recibir comandos desde ROS2 y controlar los servomotores, y realizar pruebas funcionales para asegurar que el brazo opere según lo previsto.

1. Estado del Arte

Los brazos robóticos, son dispositivos programables que imitan el movimiento y la función de un brazo humano. Se componen de una serie de eslabones conectados por articulaciones que les permiten realizar una amplia gama de movimientos, incluyendo:

- Flexión/extensión: Movimiento de un eslabón hacia adentro o hacia afuera de una articulación.
- Abducción/aducción: Movimiento de un eslabón alejándose o acercándose al cuerpo del robot.
- Rotación: Movimiento de un eslabón alrededor de su eje longitudinal.

Los brazos robóticos son muy versátiles en cuanto a sus funciones y las aplicaciones que este puede realizar. En muchas empresas implementan estos brazos robóticos también por la precisión que pueden llegar a tener en ciertas tareas; aquí se presentan algunas aplicaciones de los brazos robóticos:

- Manufactura: Puede ser el ensamblaje de productos, soldadura, pintura, manipulación de materiales.
- Logística: Desde el almacenamiento y recuperación de productos, empaquetado, paletizado.
- Medicina: Cirugía robótica, rehabilitación física, asistencia a personas con discapacidades.
- Agricultura: Cosecha de frutas y verduras, ordeño de vacas, control de plagas.
- Exploración espacial: Mantenimiento de satélites, exploración de planetas, recolección de muestras.

1.1. Componentes de un brazo robótico

Los principales componentes de un brazo robótico convencional son:

- Eslabones: Segmentos rígidos que forman la estructura del brazo.
- Articulaciones: Uniones entre eslabones que permiten el movimiento.

- **Actuadores:** Motores que proporcionan la fuerza para mover las articulaciones.
- **Sensores:** Dispositivos que recopilan información sobre el entorno del brazo.
- **Controlador:** Un sistema informático que procesa las señales de los sensores y envía comandos a los actuadores.



Figura 1: Componentes de un Brazo Robotico

Aunque según la complejidad del brazo robótico se podrían necesitar otros materiales o con otro tipo de características específicas.

1.2. Tipos de brazos robóticos

Existen gran variedad de brazos robóticos según sus características, clasificados según su diseño, cinemática y aplicación. Algunos de los tipos más comunes son:

- **Brazos robóticos articulados:** El tipo más común, con una serie de eslabones conectados por articulaciones rotativas.
- **Brazos robóticos cartesianos:** Se mueven en tres direcciones ortogonales (X, Y, Z) mediante actuadores lineales.
- **Brazos robóticos de brazo scara:** Un tipo de brazo cartesiano con mayor alcance y flexibilidad.
- **Brazos robóticos colaborativos (cobots):** Diseñados para trabajar de forma segura junto a humanos. (Blog, s/f)



Figura 2: Tipos de brazos robóticos

1.3. Evolución de los brazos Robóticos

Aquí se exponen algunas de las tecnologías clave que están impulsando el desarrollo de brazos robóticos:

- Inteligencia artificial (IA): La IA se utiliza para mejorar la precisión, la destreza y la autonomía de los brazos robóticos.
- Robótica sensorial: Los sensores cada vez más sofisticados proporcionan a los brazos robóticos una mejor comprensión de su entorno.
- Materiales avanzados: Los materiales más ligeros y resistentes están permitiendo construir brazos robóticos más eficientes y duraderos.
- Impresión 3D: La impresión 3D está facilitando la creación de brazos robóticos personalizados y complejos.

1.4. Aplicaciones futuras de los brazos robóticos

Se espera que los brazos robóticos tengan un impacto cada vez mayor en nuestras vidas en los próximos años. Algunas de las aplicaciones potenciales incluyen:

- Cuidado en el hogar: Los brazos robóticos podrían ayudar a las personas mayores y discapacitadas con tareas como cocinar, vestirse y bañarse.
- Educación: Los brazos robóticos podrían utilizarse para enseñar a los estudiantes sobre robótica, ingeniería y otras materias.
- Entretenimiento: Los brazos robóticos podrían utilizarse para crear experiencias de entretenimiento más inmersivas.

- Construcción: Los brazos robóticos podrían utilizarse para construir estructuras más seguras y eficientes.

1.5. Cinematica

(Inversa, s/f, pg 4. Estudia el movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia sin considerar las fuerzas que intervienen. Estudia, además, las relaciones entre las velocidades del movimiento de las articulaciones y las del extremo.)

1.5.1. Cinematica Inversa

(Inversa, s/f, pg 5. Consiste en determinar la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de referencia, conocidos los valores de las articulaciones (ángulos) y los parámetros geométricos de los elementos del robot.)

1.5.2. Cinematica directa

(Inversa, s/f, pg 5. Consiste en determinar la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de referencia, conocidos los valores de las articulaciones (ángulos) y los parámetros geométricos de los elementos del robot.)

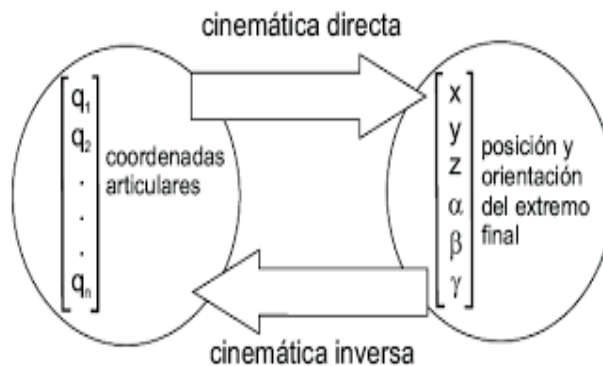


Figura 3: Comparacion cinematica inversa y directa

1.6. ROS2

O Robot Operating System 2, es la versión más reciente y avanzada del Sistema Operativo de Robots (ROS). Es una plataforma de desarrollo de código abierto diseñada para facilitar la creación y operación de sistemas robóticos complejos. A diferencia de su predecesor, ROS, ROS2 está diseñado para ser

más escalable, modular, robusto y adecuado para una variedad más amplia de aplicaciones y entornos.

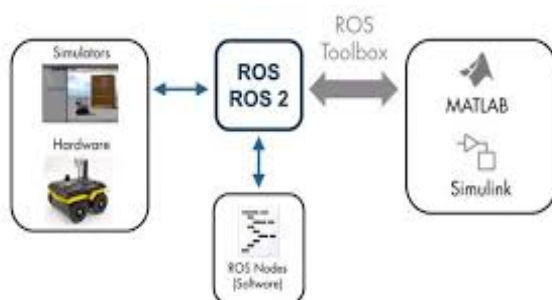


Figura 4: Aplicaciones ROS2

2. Metodología

Para el desarrollo de un brazo robótico se toma el siguiente procedimiento general, aunque este procedimiento tendrá que dividirse en etapas:

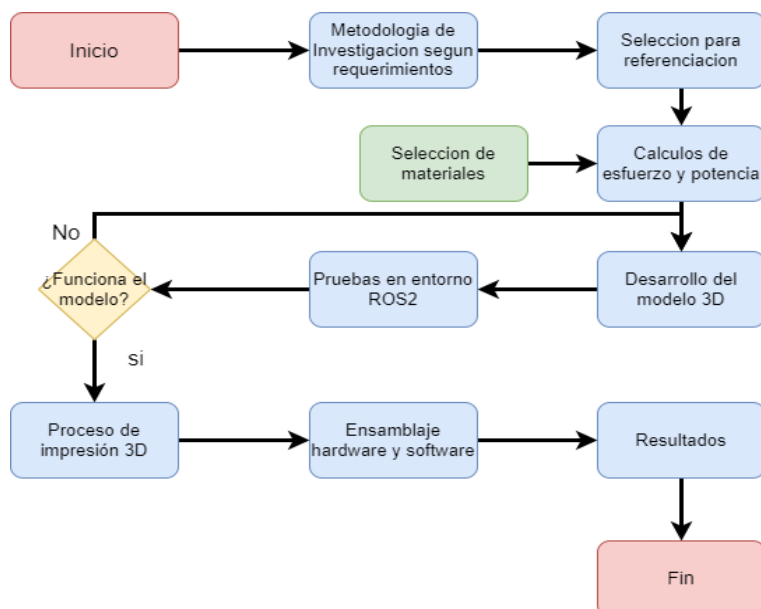


Figura 5: Ciclo de metodologia

A partir del estado del arte se pudo obtener un marco referencial respecto a proyectos con características similares tanto en el software y el hardware. Para este caso, el tipo de brazo robótico a realizar es un brazo robótico articulado el cual es rápido, confiable y seguro; a una escala pequeña, ideal para exposición en términos académicos. La estructura, es decir, el hardware, está basado en este video: ([@FABRIcreator], 2024). Para términos de seguimiento de avances se utiliza la plataforma de trello para buscar eficiencia en el proceso de cada uno de los participantes; este proyecto se divide en tres etapas principales: Diseño, definición de presupuesto y ensamble

2.1. Diseño

Teniendo en primera instancia el diseño se procede a hacer cálculos generales de los eslabones y el ensamble en general para así tener una idea de variables a tener en cuenta como torque necesario de los servomotores, esfuerzo, entre otras para así hacer la respectiva selección de materiales. Para hacer cálculos generales se necesita una densidad específica para determinar la masa por cada cm^3 , por esto se acude a la siguiente tabla tomada de (Fonseca, s/f, p.26).

Cuadro 1: Comparación de materiales

| Características / Material | Aluminio | Acero | Polímeros (PLA) | Titanio |
|----------------------------|----------|-------|-----------------|---------|
| Densidad | 7 | 5 | 9 | 3 |
| Transformación | 8 | 8 | 3 | 3 |
| Acceso | 7 | 7 | 7 | 2 |
| Restricciones intrínsecas | 7 | 8 | 5 | 9 |
| Ensamblaje | 8 | 6 | 6 | 7 |
| Resistencia mecánica | 7 | 8 | 6 | 10 |
| Compatibilidad | 5 | 2 | 3 | 10 |
| Precio | 6 | 6 | 5 | 1 |
| Total | 55 | 50 | 51 | 45 |

Se toma la decisión de elegir la sección de polímeros, específicamente el PLA (Poliácido Láctico), ya que como su objetivo es demostrarse en ámbitos académicos, su precio es el más asequible, esto sin desmeritar las propiedades y ventajas que ofrece este material. Este material cuenta con una densidad de $1,24 \text{ g/cm}^3$. Por consiguiente es necesario un procedimiento gráfico para hacer la resolución de cálculos, es por eso que se diseña un diagrama de cuerpo libre tentativo para así tener una guía procedimental. A continuación se presenta una tabla con cada una de las piezas que componen al brazo robótico y sus características para términos de cálculos.

Ahora se procede a hacer los cálculos generales

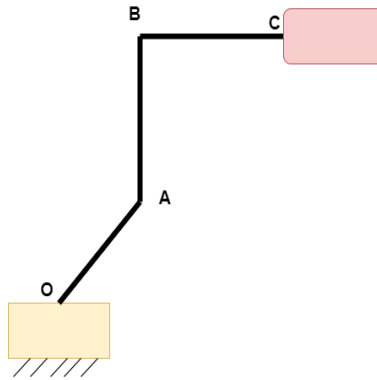


Figura 6: Diagrama de cuerpo Libre

Cuadro 2: Pesos y medidas de los componentes del brazo robótico

| Componente | Peso | Medida |
|-------------------|-------------|---------|
| Servomotor MG996R | 55 gramos | - |
| Servomotor SG90 | 9 gramos | - |
| Sección OA | 85 gramos | 4,05 cm |
| Sección AB | 68,3 gramos | 12,0 cm |
| Sección BC | 62,2 gramos | 9 cm |
| Sistema Garra | 32 gramos | 6,3 cm |

2.1.1. Cálculos

Parámetros

$$L_1 = 0,0405 \text{ m}, \quad m_1 = 0,855 \text{ kg} \quad (1)$$

$$L_2 = 0,12 \text{ m}, \quad m_2 = 0,682 \text{ kg} \quad (2)$$

$$L_3 = 0,09 \text{ m}, \quad m_3 = 0,62 \text{ kg} \quad (3)$$

$$L_4 = 0,063 \text{ m}, \quad m_4 = 0,57 \text{ kg} \quad (4)$$

$$\text{Carga tentativa} = 0,5 \text{ kg} \quad (5)$$

Peso de cada segmento

$$F_{g1} = 0,855 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 8,38355 \text{ N} \quad (6)$$

$$F_{g2} = 0,682 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 6,68842 \text{ N} \quad (7)$$

$$F_{g3} = 0,62 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 6,0822 \text{ N} \quad (8)$$

$$F_{g4} = 0,57 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 5,5917 \text{ N} \quad (9)$$

$$F_c = 0,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 4,905 \text{ N} \quad (10)$$

Distancia desde articulación a centro de masa: Se supone las articulaciones como barras, por lo tanto, su centro de masa va a ser la mitad de su medida

$$d_{cm1} = \frac{L_1}{2} = 0,02025 \text{ m} \quad (11)$$

$$d_{cm2} = \frac{L_2}{2} = 0,06 \text{ m} \quad (12)$$

$$d_{cm3} = \frac{L_3}{2} = 0,045 \text{ m} \quad (13)$$

$$d_{cm4} = \frac{L_4}{2} = 0,0315 \text{ m} \quad (14)$$

Calculo de momento para cada articulacion

- Articulación 4 (debido al segmento 4 y la carga)

$$M_4 = F_{g4} \cdot d_{cm4} = 5,5917 \cdot 0,0315 = 0,17614905 \text{ Nm}$$

$$M_c = F_c \cdot L_4 = 4,905 \cdot 0,063 = 0,309015 \text{ Nm}$$

$$M_{total4} = 0,17614905 + 0,309015 = 0,48516405 \text{ Nm}$$

- Articulación 3 (debido al segmento 3, segmento 4 y la carga)

$$\begin{aligned} M_3 &= F_{g3} \cdot d_{cm3} \\ &= 6,0822 \cdot 0,045 \\ &= 0,273699 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{total3} &= M_3 + (M_{total4} + F_{g4} \cdot L_3 + F_c \cdot (L_3 + L_4)) \\ &= 0,273699 + (0,48516405 + 5,5917 \cdot 0,09 + 4,905 \cdot (0,09 + 0,063)) \\ &= 0,273699 + (0,48516405 + 0,503253 + 0,750165) \\ &= 0,273699 + 1,73858205 \\ &= 2,01228105 \text{ Nm} \end{aligned}$$

- Articulación 2 (debido al segmento 2, segmento 3, segmento 4 y la carga)

$$\begin{aligned} M_2 &= F_{g2} \cdot d_{cm2} \\ &= 6,68842 \cdot 0,06 \\ &= 0,4013052 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{\text{total2}} &= M_2 + (M_{\text{total3}} + F_{g3} \cdot L_2 + F_{g4} \cdot (L_2 + L_3) + F_c \cdot (L_2 + L_3 + L_4)) \\
&= 0,4013052 + (2,01228105 + 6,0822 \cdot 0,12 + 5,5917 \cdot (0,12 + 0,09) \\
&\quad + 4,905 \cdot (0,12 + 0,09 + 0,063)) \\
&= 0,4013052 + (2,01228105 + 0,729864 + 1,174257 + 1,339065) \\
&= 0,4013052 + 5,25546705 \\
&= 5,65677225 \text{ Nm}
\end{aligned}$$

- Articulación 1 (debido al segmento 1, segmento 2, segmento 3, segmento 4 y la carga)

$$\begin{aligned}
M_1 &= F_{g1} \cdot d_{cm1} \\
&= 8,38355 \cdot 0,02025 \\
&= 0,1697953875 \text{ Nm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{\text{total1}} &= M_1 + (M_{\text{total2}} + F_{g2} \cdot L_1 + F_{g3} \cdot (L_1 + L_2) + F_{g4} \cdot (L_1 + L_2 + L_3) + F_c \cdot (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)) \\
&= 0,1697953875 + (5,65677225 + 6,68842 \cdot 0,0405 + 6,0822 \cdot (0,0405 + 0,12) \\
&\quad + 5,5917 \cdot (0,0405 + 0,12 + 0,09) + 4,905 \cdot (0,0405 + 0,12 + 0,09 + 0,063)) \\
&= 0,1697953875 + (5,65677225 + 0,27087401 + 0,9762491 + 1,40017885 + 1,5374175) \\
&= 0,1697953875 + 9,84149171 \\
&= 10,0112871 \text{ Nm}
\end{aligned}$$

- Resultado

Los momentos calculados para cada articulación son:

Articulación 4: 0,4852 Nm

Articulación 3: 2,0123 Nm

Articulación 2: 5,6568 Nm

Articulación 1: 10,0113 Nm

Es de aclarar que estos calculos da una idea del torque y de saber si es apropiado tener los servomotores que se postularon en un inicio, y por esto se supone que los motores MG996R y SG90 tienen la capacidad de torque.

Si bien en un principio el diseño para su respectiva impresión 3D de las piezas que conforman el brazo robótico ya estaban listas, fue necesario realizar el brazo a partir de las medidas de este mismos en solidworks, ya que para la simulación y obtención de planos para este software eran incompatibles los archivos. Una vez listas las piezas y el ensamblaje se procede a hacer simulación dinámica en el software para la respectiva comparación con los cálculos realizados anteriormente.

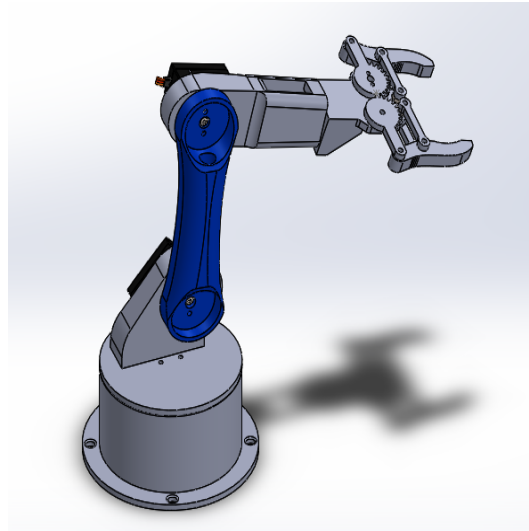


Figura 7: Modelo en solidworks

En el aspecto del software para el control del robot se diseñó un código en Python inicialmente para hacer la respectiva simulación en ROS2 y así verificar los resultados de dicha simulación con las posibles fallas del sistema. Una vez teniendo todo el aspecto de diseño listo se procede a la cotización de materiales y la realización de un presupuesto tentativo.

2.2. Presupuesto

Para hacer un respectivo presupuesto para la realización de un brazo robótico fue necesario revisar y analizar el estado del arte que conlleva este tipo de proyectos, incluyendo también un marco referencial, requisitos suministrados por el tutor y algunas sugerencias de este mismo. Al hacer este proceso se pudieron implementar los siguientes materiales, a su vez se establece un posible presupuesto para implementar.

Es necesario tener en cuenta que los precios son tomados de internet en sitios como mercado libre, Amazon y google shopping; es por esto que, puede ser que estos materiales comprados de manera física pueden variar su precio, probablemente sea menor su precio unitario.

Se tomaron los precios promedio del mercado, ya que en internet aparecen artículos con mayor y menor precio. Es por esto que se considera que el presupuesto necesario para el debido desarrollo de este proyecto sea de COP \$350.000.

Cuadro 3: Materiales y Presupuesto

| Materiales | Cantidad | Precio Total |
|-------------------|----------|------------------|
| Filamento PLA | 1 Kg | \$80.000 |
| Servomotor MG996R | 2 | \$60.000 |
| Servomotor MG90S | 1 | \$18.000 |
| Servomotor SG90 | 1 | \$13.000 |
| Modulo PCA9685 | 1 | \$30.000 |
| Arduino Mega | 1 | \$150.000 |
| Tornillos m3 12mm | 10 | \$10.000 |
| Tornillos m3 16mm | 10 | \$10.000 |
| Misceláneos | N/A | \$20.000 |
| Total: | | \$325.000 |

2.3. Ensamble

En esta parte del proceso es preciso indicar que se divide en dos partes, la parte de conexiones electronicas, y la parte estructural del brazo robotico. Para la parte de conexiones electronicas fue de gran ayuda el uso del modulo PCA9685, ya que reduce las conexiones al arduino y asi se puede optimizar mejor el codigo. En este caso se utilizaron exclusivamente 5 servomotores.

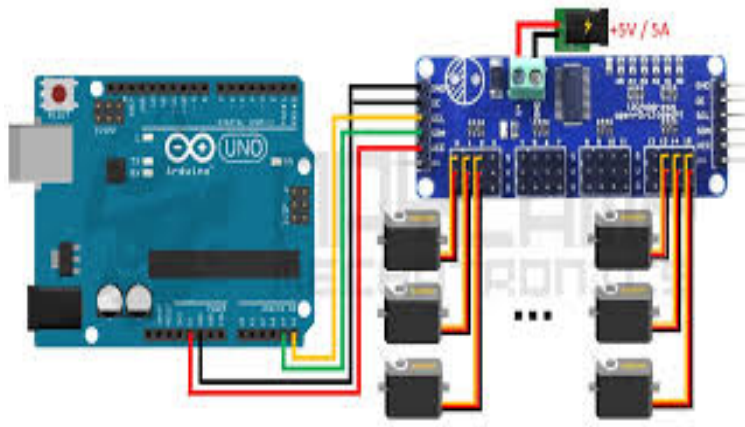


Figura 8: Conexiones del Brazo Robotico

Como ya se tenía el diseño, se procedió a someter el diseño a impresión 3D para la obtención de los eslabones y/o estructura del brazo robótico, el cual con la impresora que se usó tuvo un tiempo aproximado de 18 horas para la obtención de las piezas. Teniendo las piezas y todos los elementos necesarios para su construcción se procedió a ensamblar.

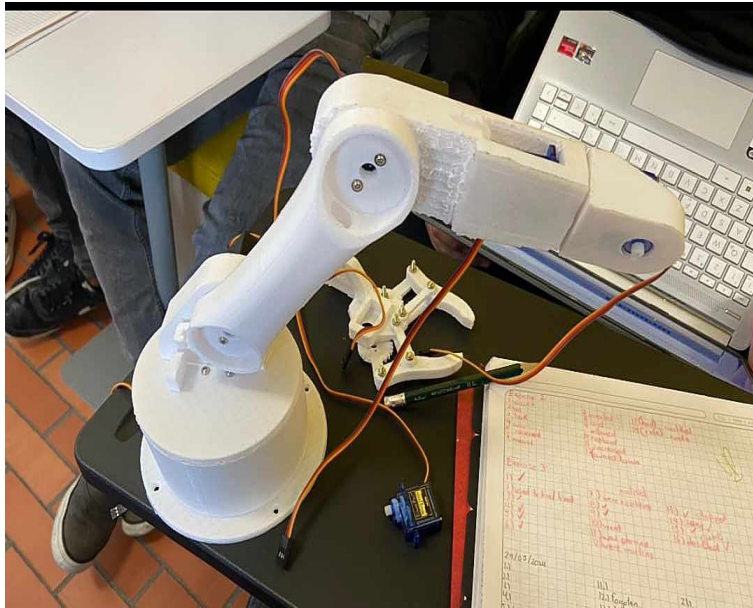


Figura 9: Proceso de ensamblaje

Implementación

Una vez teniendo el hardware, fue necesario acoplar el software al sistema. El software, se hizo un código en arduino para el respectivo control de posición del brazo robótico, luego se sometió a pruebas tales como de carga de objetos, coincidencia de posición, pruebas de velocidad, entre otros. Fue necesario ajustar varios parámetros después de exhaustivas pruebas, ya que en el control del brazo robótico hubieron percances.

Resultados

Al final de hacer todo el proceso de cinemática y sus respectivas correcciones en el código de control, se logró controlar efectivamente el brazo robótico, teniendo una buena respuesta y suavizada en cada movimiento de las articulaciones que contiene este, también se logró reducir el ruido por fricción de cada motor, ya que en este sistema no se implementó sistema de transmisión de potencia alguna, los servomotores van directamente acoplados a las articulaciones, pero ocurría una fricción, fue necesario acoplar arandelas para reducir su fricción. También se corrigió cuestiones de diseño de algunas articulaciones, especialmente la sección 4, ya que no quedaba bien incrustada y generaba oscilaciones. En cuestiones de conexiones eléctricas fue necesario acoplar una batería de mayor amperaje para los 5 servomotores, pero manteniendo el voltaje

de 5v+. Aqui se puede observar una prueba de ello:

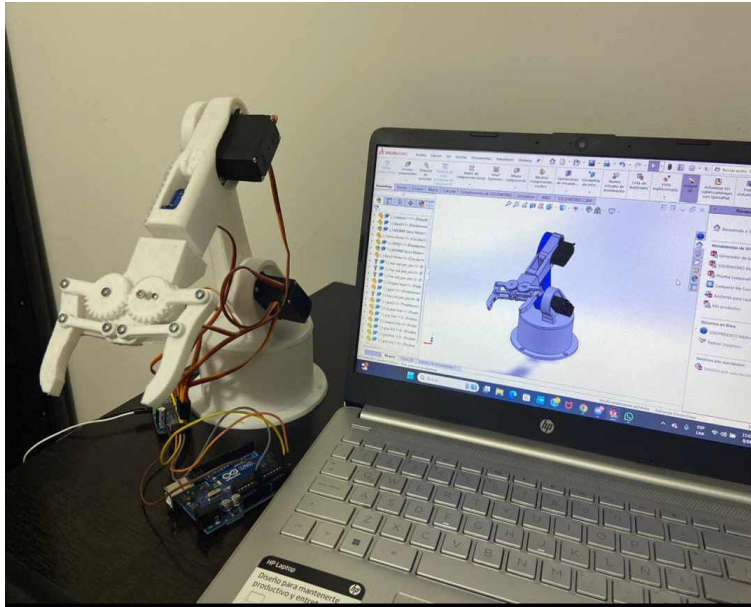


Figura 10: Resultado de Brazo robótico

Conclusiones

- Hubieron varias complicaciones y fallas en el desarrollo y puesta a prueba del proyecto, principalmente en el diseño 3D y su respectiva simulacion, y en la parte de control.
- Con este proyecto se evidencio la cobertura de forma extensa las ramas que estan inmersos los ingenieros mecatronicos (programacion, diseño mecanico, control).
- Se logró el objetivo inicial del proyecto que era diseñar y construir un brazo robótico articulado de 4 grados de libertad con un sistema de agarre integrado.
- Hay cuestiones por mejorar para futuros proyectos como un mejor analisis mecanico para iniciar pruebas reales y asi no someter a cualquier peligro a los componentes.

Referencias

- Creator, F. [@FABRIcreator]. (2024, abril 2). Brazo robótico con Arduino - Robotic Arm - Guardar/Reproducir/Exportar/Importar Movimientos. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=1b1YxPmp97I>
- Fonseca, C. R. D. (s/f). DISEÑO DE UN BRAZO ROBÓTICO ARTICULADO. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/50508/PROYECTO>
- Blog, S. (s/f). Tipos de brazos robóticos: mostramos sus aplicaciones industriales. Structuralia.com. Recuperado el 9 de junio de 2024, de <https://blog.structuralia.com/tipos-de-brazos-roboticos>
- ChatGPT. (s/f). Chatgpt.com. Recuperado el 9 de junio de 2024, de <https://chatgpt.com/c/f5244bcc-f142-42ad-9e86-fb37764fb340>
- Curso de ROS2 para principiantes. (2024, febrero 16). Curso de Instalador. <https://cursodeinstalador.com/curso-de-ros2-para-principiantes/>
- Gemini: Chatea para potenciar tus ideas. (s/f). Gemini. Recuperado el 9 de junio de 2024, de <https://gemini.google.com/app/dda1587cd7588981>
- Inversa, C. (s/f). Fundamentos de Robótica. Uta.cl. Recuperado el 9 de junio de 2024, de http://www.eudim.uta.cl/rmendozag/courses/fundamentos_robotica/lectures/cinematica_inversa.pdf
- Vier, P. (s/f). ¿Qué son las articulaciones de un robot? Coldjet.com. Recuperado el 9 de junio de 2024, de <https://blog-mx.coldjet.com/que-son-las-articulaciones-de-un-robot>

Anexos

CODIGO DE CINEMATICA DIRECTA E INVERSA

- <https://colab.research.google.com/drive/1DMUY4OwlwX3rFa-4xcwDKS5D9bfk0bg9scrollTo=CO6j5qAKPTxf>

Github

- https://github.com/JorgeMarin5692/Robotica_industrial/tree/master