

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**CONTROL DE UN ROBOT CON ARQUITECTURA
ANTROPOMÓRFICA DE CINCO GRADOS DE LIBERTAD**

**CONTROL DE UN ROBOT CON ARQUITECTURA
ANTROPOMÓRFICA DE CINCO GRADOS DE LIBERTAD QUE
REALICE TAREAS DE PALETIZACIÓN**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

ERICK ORLANDO CHÁVEZ TOAPANTA

erick.chavez@epn.edu.ec

DIRECTOR: NELSON GONZALO SOTOMAYOR OROZCO, MSc.

nelson.sotomayor@epn.edu.ec

DMQ, julio 2024

CERTIFICACIONES

Yo, ERICK ORLANDO CHÁVEZ TOAPANTA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Erick Orlando Chávez Toapanta

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ERICK ORLANDO CHÁVEZ TOAPANTA, bajo mi supervisión.

Nelson Sotomayor, MSc.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos resultantes del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ERICK ORLANDO CHÁVEZ TOAPANTA

NELSON GONZALO SOTOMAYOR OROZCO, MSc.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todas las personas que han sido parte fundamental en mi vida y en este proyecto. A mi familia, por su apoyo incondicional y amor constante, y a mis amigos, cuya compañía y ánimo han hecho este viaje más agradable y valioso. Además, a Reyna y Eloti, “las michis”, cuya presencia y cariño han sido una fuente de consuelo y alegría en los momentos más desafiantes. Gracias a todos por su respaldo y por ser una fuente constante de inspiración y fortaleza. Este logro es el reflejo de su confianza y aliento.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales para la realización de este trabajo de integración curricular y para mi desarrollo a lo largo de toda la carrera:

En primer lugar, agradezco a Nelson Sotomayor, por su invaluable guía, apoyo constante y paciencia durante el desarrollo de este proyecto. Su conocimiento y experiencia fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.

A mi compañera de proyecto, de carrera y amiga, Gabi. Su colaboración incansable y su generosidad para compartir sus conocimientos y habilidades hicieron de este trabajo un verdadero éxito. Siempre ha sido una persona muy estudiosa y dedicada, y su apoyo académico a lo largo de nuestra carrera fue incalculable. Su esfuerzo y compromiso jugaron un papel crucial en cada paso de nuestro camino, y contribuyeron significativamente a que pudiéramos culminar nuestra carrera con éxito. Gabi, tu amistad y dedicación fueron fundamentales para superar los desafíos y alcanzar nuestras metas.

A mi familia, especialmente a mi papá Luis. Su esfuerzo y sacrificio inagotables fueron el motor que me impulsó a seguir adelante. Cada apoyo, cada palabra de aliento y cada sacrificio que hizo para asegurarme un futuro mejor fueron invaluableles. Sin su dedicación y amor incondicional, no habría llegado hasta aquí. A mis hermanos Sebastián y Andrew, a mi mamá Gaby, y a mi abuelita Elena, por su amor constante, su comprensión y su apoyo en cada paso del camino. Su aliento y sacrificios fueron una fuente de motivación constante, y sin su respaldo incondicional, este logro no habría sido posible.

A Vicky, cuyo apoyo incondicional fue una luz constante en mi vida. En los momentos más difíciles, cuando sentía que el camino se volvía casi imposible, Vicky siempre estuvo ahí para ayudarme a seguir adelante. Su apoyo sincero y desinteresado fue un verdadero pilar en mi vida académica y personal. Gracias a ella, soy lo que soy ahora. Vicky, tu aliento y dedicación me dieron fuerzas cuando más las necesitaba, y por eso te estoy muy agradecido.

A la casa "RKG", un grupo de amigos que se convirtió en una verdadera familia. Quiero destacar especialmente a Tao, quien nos dejó recientemente. Tao fue como un hermano para mí, siempre con una palabra de aliento y una sonrisa que iluminaban incluso los días más oscuros. Su amistad y calidez dejaron una huella profunda en mi corazón. También agradezco de todo corazón a Bernardo, Bryan, Diego, Wanny, Dennis, César y Gabo. Su

apoyo constante y compañía fueron una fuente de fortaleza y motivación a lo largo de este viaje.

A los mejores amigos que tuve en la carrera, Tamara, Samuel y Sebas. Compartir con ustedes los altibajos de la universidad ha sido una experiencia verdaderamente inolvidable. Los momentos que vivimos juntos, desde las largas horas de estudio hasta las risas y aventuras que marcaron nuestra amistad, han sido parte fundamental de este viaje. Tamara, Samuel y Sebas, su lealtad, alegría y apoyo incondicional han hecho que cada desafío sea más llevadero y cada éxito más significativo. Siempre recordaré con cariño cada instante que compartimos, y valoro muchísimo la amistad que construimos a lo largo de estos años.

A los amigos que hice a lo largo de la carrera: Nathy, Johao, Marco, Carlita, Yuli, Karito, Kerly, Andrés, Betty, Jos, Jou, Kevin, Ney, Steve, Xavi E., Xavi H., Ian, Mauricio, Karen y Henry. Cada uno de ustedes ha sido una parte fundamental de mi experiencia universitaria. Los momentos que compartimos y el respaldo que me dieron hicieron que este camino fuera mucho más enriquecedor y llevadero. No solo ayudaron a mi crecimiento académico, sino que también hicieron de esta etapa un viaje inolvidable.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	OBJETIVO GENERAL	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3	ALCANCE	2
1.4	MARCO TEÓRICO	3
1.4.1	ROBOT CON ARQUITECTURA ANTROPOMÓRFICA DE 5GDL	3
1.4.2	CONTROLADORES EN BAJO Y ALTO NIVEL.....	6
1.4.3	MEMORIA COMPARTIDA.	9
1.4.4	ACTUADOR.	10
1.4.5	CINEMÁTICA UTILIZADA EN ROBOTS SIMILARES.	12
2	METODOLOGÍA	16
2.1	EFFECTOR FINAL TIPO PINZA DE DOS DEDOS.....	16
2.2	INCORPORACIÓN DEL MOTOR DYNAMIXEL MX28	21
2.3	ADAPTACIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL EN BAJO NIVEL.....	23
2.4	ADAPTACIÓN DE LA MEMORIA COMPARTIDA	24
2.5	CINEMÁTICA INVERSA DEL ROBOT CON ARQUITECTURA ANTROPOMÓRFICA DE 5 GDL.....	24
2.5.1	Cálculo de las ecuaciones de los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3	25
2.5.2	Cálculo de las ecuaciones de los ángulos θ_4 y θ_5	28
2.6	CONTROL EN ALTO NIVEL.....	29
2.7	HOJA GUÍA PRACTICA DE PALETIZACIÓN	33
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	36
3.1	RESULTADOS.....	36
3.1.1	Procedimiento y resultados documentados	36
3.1.2	Cálculo y análisis de los errores	43
3.1.3	Cálculo y análisis de repetibilidad.....	45
3.2	LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTO.....	46
3.3	CONCLUSIONES	47
3.4	RECOMENDACIONES	48
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
5	ANEXOS.....	50

RESUMEN

En el presente trabajo de integración curricular se plantea como fin el control de un brazo robótico de 5 grados de libertad para tareas de paletización. El brazo que se utilizará fue ensamblado en el TIC “Ensamblaje y Control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad”, en este TIC se realizó el control tanto en alto nivel como en bajo nivel. Tomando como base dichos controladores se realizó la adaptación necesaria para que el robot realice tareas de paletización. Además, se desarrolló una interfaz gráfica en MATLAB-Simulink donde se encuentra implementada la cinemática para el control del movimiento angular de cada uno de los motores, en dicha interfaz gráfica el usuario debe ingresar las coordenadas de inicio y fin para realizar las tareas de paletización. Adicionalmente para complementar al robot ensamblado se manufacturó un efector final tipo pinza de 2 dedos cuyos planos de diseño se obtuvieron del proyecto de investigación PIMI-14-04. Al culminar con este proyecto, el laboratorio de Sistemas de control del DACI contará con un prototipo de un brazo robótico de 5 GDL que tenga la capacidad de realizar tareas de paletización para realizar prácticas de laboratorio de la asignatura de Robótica. Estos resultados consolidados representarán no solo la culminación exitosa de los esfuerzos invertidos en el proyecto, sino también una contribución significativa para fortalecer las capacidades del laboratorio y facilitar la realización de prácticas educativas aplicadas en el entorno de la robótica.

PALABRAS CLAVE: antropomórfico, paletización, grados de libertad.

ABSTRACT

This curricular integration project aims to control a 5-degree-of-freedom robotic arm for palletizing tasks. The arm to be used was assembled in the TIC project "Assembly and Control of a Robot with an Anthropomorphic Architecture of Five Degrees of Freedom," in which both high-level and low-level control were implemented. Based on these controllers, the necessary adaptation was made for the robot to perform palletizing tasks. Additionally, a graphical interface in MATLAB-Simulink was developed, where the kinematics for controlling the angular movement of each motor is implemented. In this graphical interface, the user must enter the start and end coordinates to carry out the palletizing tasks. Furthermore, to complement the assembled robot, a two-finger gripper-type end effector was manufactured, with design plans obtained from the research project PIMI-14-04. Upon completion of this project, the Control Systems Laboratory of DACI will have a prototype of a 5-DOF robotic arm capable of performing palletizing tasks for laboratory practices in the Robotics course. These consolidated results will not only represent the successful culmination of the efforts invested in the project but also a significant contribution to strengthening the laboratory's capabilities and facilitating the execution of applied educational practices in the field of robotics.

KEYWORDS: anthropomorphic, palletizing, degrees of freedom.

1 INTRODUCCIÓN

En el dinámico panorama tecnológico actual, la capacidad humana para dar forma a su entorno ha desencadenado el desarrollo constante de soluciones robóticas avanzadas. Este proyecto de integración curricular se centra en el control de un brazo robótico de 5 grados de libertad para llevar a cabo tareas de paletización.

Este proyecto responde a desafíos y necesidades presentes en entornos industriales, en donde se puede usar estos brazos robóticos para transporte de materiales de un lugar a otro, haciendo de la paletización una herramienta esencial para mejorar la eficiencia y precautelar la integridad de los recursos humanos al reducir los riesgos asociados a la manipulación de objetos.

El alcance del proyecto no se limita al control de los motores del brazo robótico; se extiende hacia la integración de un efector final tipo pinza de dos dedos. Este componente, manufacturado y ensamblado a partir de los planos obtenidos del proyecto de investigación PIMI-14-04, juega un papel esencial en las tareas de paletización.

La interfaz gráfica, desarrollada en MATLAB - Simulink, añade una capa de interactividad esencial al proyecto. Permitiendo al usuario definir de manera intuitiva y eficiente las coordenadas para la ejecución de tareas de paletización, esta interfaz agrega una dimensión práctica y accesible a la operación del sistema, facilitando la interacción entre humanos y máquinas.

Este proyecto de integración curricular alcanzará como resultado la manufactura y ensamblaje de un efector final tipo pinza de dos dedos. Además, se desarrollará el software necesario en alto y bajo nivel para la implementación del control para tareas de paletización de este robot con arquitectura antropomórfica de 5 grados de libertad. Adicionalmente, se elaborará un manual de usuario detallado y se realizará el diseño de una hoja guía específica para llevar a cabo una práctica orientada a tareas de paletización en el laboratorio de la asignatura Robótica de la Carrera en Electrónica y Automatización.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad que realice tareas de paletización.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar revisión bibliográfica del TIC “Ensamblaje y Control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad” con el objetivo de conocer cómo se realizan las acciones de control en bajo y alto nivel

Realizar la revisión bibliográfica del proyecto de investigación PIMI-14-04 con el fin de obtener los planos para manufacturar las piezas del efector final tipo pinza de dos dedos

Manufacturar y ensamblar un efector final tipo pinza de 2 dedos que fue diseñado en el proyecto PIMI-14-04.

Adaptar el software de control en alto y bajo nivel desarrollado en el proyecto de TIC “Ensamblaje y Control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad” para realizar tareas de paletización.

Desarrollar una interfaz gráfica en MATLAB - Simulink que permita realizar el control del Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad para realizar tareas de paletización.

Realizar pruebas del funcionamiento del prototipo de robot con arquitectura antropomórfica con 5 GDL en base a una hoja guía para realizar una práctica sobre tareas de paletización en el laboratorio de robótica del DACI.

1.3 ALCANCE

Realizar una revisión bibliográfica del diseño del robot antropomórfico de cinco grados de libertad desarrollado en el proyecto de TIC “Ensamblaje y Control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad”, con la finalidad de conocer la forma en que se realiza las diferentes acciones de control tanto en alto nivel como en bajo nivel.

Realizar una revisión bibliográfica del diseño del robot antropomórfico de cinco grados de libertad desarrollado en el proyecto de investigación PIMI-14-04 con el fin de obtener los planos para manufacturar las piezas para ensamblar el efector final.

Manufacturar y ensamblar un efector final de dos dedos para el robot antropomórfico de cinco grados de libertad diseñado en el proyecto PIMI-14-04.

Desarrollar una interfaz gráfica en Matlab-Simulink que permita realizar el control del robot antropomórfico de cinco grados de libertad para realizar tareas de paletización.

Adaptar el bloque de memoria compartida desarrollado en el proyecto de TIC “Ensamblaje y Control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad”, para enlazar el controlador en alto nivel con el controlador en bajo nivel añadiendo los datos correspondientes al motor del efector final.

Adaptar el software del controlador en bajo nivel desarrollado en el proyecto de TIC “Ensamblaje y Control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad”, que se encargará de controlar el movimiento de los motores del robot y la comunicación con la interfaz gráfica en Matlab-Simulink añadiendo el control del efector final.

Realizar pruebas de funcionamiento del prototipo realizando el control de tareas de paletización en el robot antropomórfico de cinco grados de libertad.

1.4 MARCO TEÓRICO

En esta sección se realiza la revisión bibliográfica del trabajo de integración curricular “Ensamblaje y Control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad” [1]. Además, se presentan los planos del efector final tipo pinza de 2 dedos diseñado en el proyecto de investigación PIMI-1404, así como las características del servomotor asociado al efector final tipo pinza de 2 dedos, y modo de integrarlo al brazo.

Finalmente se expondrá los criterios utilizados por otros autores para la elección del modelo cinemático para efectuar el control de un robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL que realice tareas de paletización.

1.4.1 ROBOT CON ARQUITECTURA ANTROPOMÓRFICA DE 5GDL [1]

En esta sección se presentan los componentes constitutivos del robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL, separándolos en tres grupos importantes: componentes estructurales, motores y sistema electrónico.

1.4.1.1 Componentes estructurales

Este robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL tiene dos componentes mecánicos la base y el brazo.

Base:

Es el soporte donde se apoya todo el robot ensamblado además posee un juego de rodamientos que hacen que la base tenga la posibilidad de rotar dando así un eje de giro adicional al brazo robótico. El modelo en 3D de la base esta mostrado en la Figura 1.1.

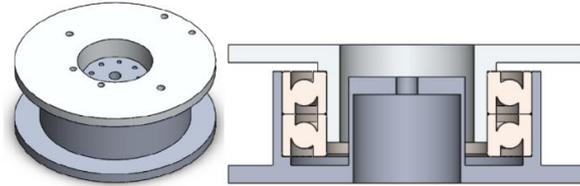


Figura 1.1. Base del robot antropomórfico de 5GDL [1]

Brazo:

El brazo es una estructura tubular que se encuentra dividida en dos tramos, en el primer tramo, conformado por la base y antebrazo, se encuentran dos eslabones y en el segundo tramo conformado por la muñeca y antebrazo con un eslabón, dando así un total de tres eslabones para este componente estructural. El modelo en 3D del brazo tubular está mostrado en la Figura 1.2.

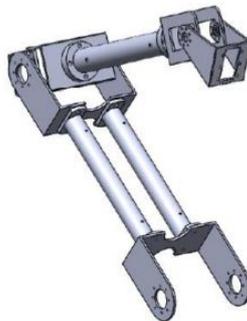


Figura 1.2. Brazo del robot antropomórfico de 5GDL [1]

1.4.1.2 Motores

El robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL cuenta con 6 motores los cuales se mencionan a continuación:

- 3 motores modelo Torxis
- 1 motor modelo Dynamixel Pro
- 1 motor modelo Dynamixel MX-28
- 1 motor modelo Dynamixel MX-64

Los motores mencionados anteriormente se encuentran ubicados en la estructura del robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL como se ilustra en la Figura 1.3.

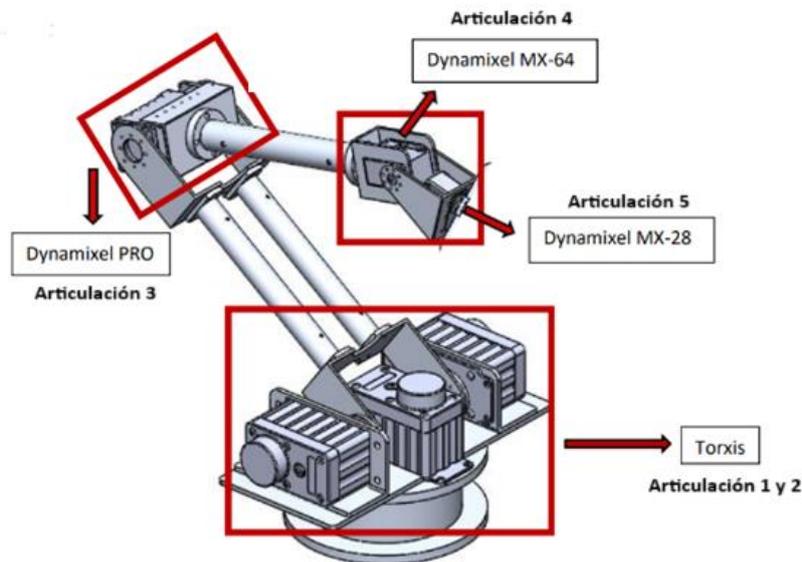


Figura 1.3. Brazo del robot antropomórfico de 5GDL. [1]

Luego de la localización de los motores se define los rangos de giro de estos, los cuales están formado por 5 articulaciones que se especifican a continuación:

- Articulación 1 (base): rotación de 0° a 180° .
- Articulación 2 (base-codo): rotación de 0° a 90° .
- Articulación 3 (codo muñeca): rotación de 0° a 150° .
- Articulación 4 (muñeca): rotación de 0° a 180° .
- Articulación 5 (muñeca-efector final): rotación de 0° a 360° .

1.4.1.3 Sistema electrónico.

Para el sistema electrónico se cuenta con los siguientes componentes:

- Computador personal.
- Sistema embebido Arduino Mega.
- Interfaz de comunicación RS-485.

Con estos elementos y los motores se tiene el diagrama de conexiones general del brazo robótico de 5 GDL mostrado en la Figura 1.4.

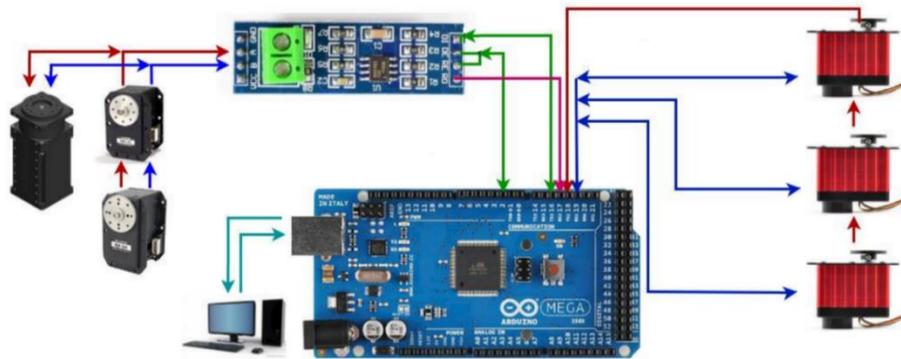


Figura 1.4. Sistema electrónico general del robot antropomórfico de 5GDL [1]

1.4.2 CONTROLADORES EN BAJO Y ALTO NIVEL.

La arquitectura de control parte del computador donde se realiza el control en alto nivel, este control envía la acción a una memoria compartida la cual adecua la misma para ser enviada al Arduino donde se realiza el control en bajo nivel y por medio de la interfaz RS-485 se comanda a motores directamente. Para el retorno de información se sigue el orden inverso, es decir los motores envían la información de posición al Arduino por medio de la interfaz RS-485, a excepción de los motores torxis que se comunican mediante USART directamente con el sistema embebido, el Arduino envía la información a la memoria compartida donde se adecuan los datos para que posteriormente se puedan leer en el control de alto nivel. En la Figura 1.4. se indica la arquitectura del programa de control del robot antropomórfico de 5 GDL.

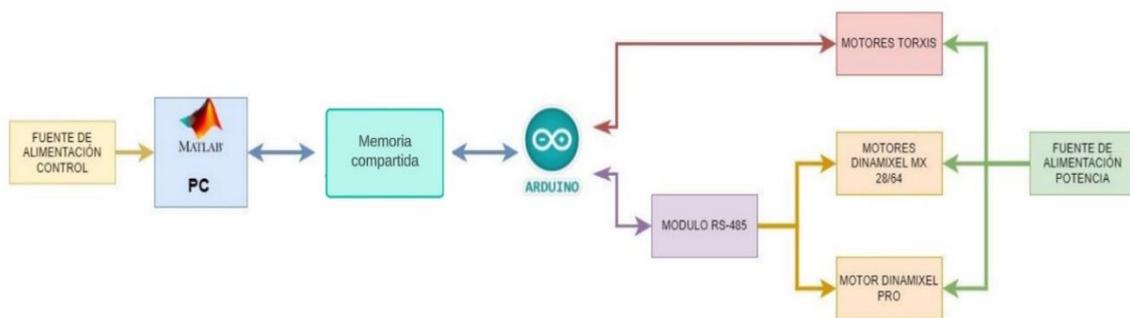


Figura 1.4. Arquitectura del programa de control del robot antropomórfico de GDL [1]

1.4.2.1 Programa de control en alto nivel.

El control en alto nivel se encuentra en la interfaz gráfica desarrollada en MATLAB-Simulink, donde se tiene el modelo cinemático inverso el cual posee como entradas las Figuras de trazado, la orden de marcha del dibujado y una señal de reloj, y dado que el propósito del modelo es obtener una ruta, se tiene que a la salida del modelo se da el movimiento angular de cada uno de los motores. El bloque de simulink correspondiente al modelo cinemático está mostrado en la Figura 1.5.

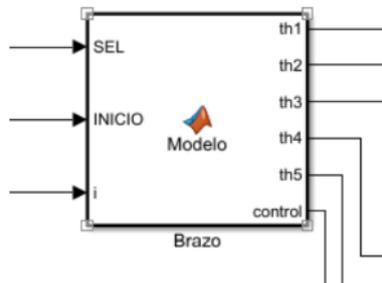


Figura 1.5. Bloque en Simulink del modelo cinemático inverso del brazo robótico de 5 GDL [1]

En la Figura 1.5 se tiene el bloque que ejecuta el modelo cinemático, el cual se encuentra realizado mediante programación dentro de la máscara de este, dicho bloque en conjunto con el resto de los elementos da como resultado el diagrama completo del control en alto nivel mostrado en la Figura 1.6.

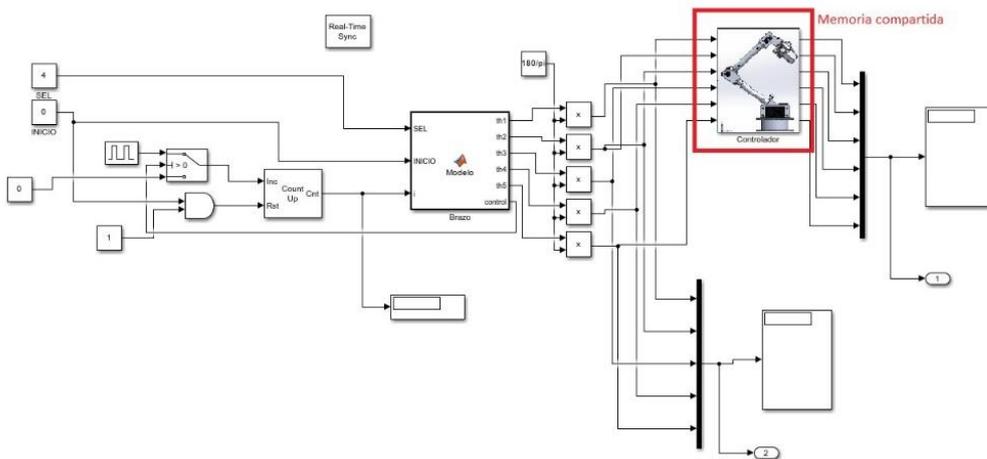


Figura 1.6. Diagrama de Simulink del control en alto nivel [1]

El software para el control en alto nivel se encuentra asociado directamente con la interfaz con la que el usuario puede operar el brazo, para realizar el trazado de figuras

predeterminadas, la interfaz gráfica que opera el robot con arquitectura antropomórfica mostrada en la Figura 1.7. Está conformada por:

1. Menú de selección de figuras
2. Interruptor de inicio de trazado
3. Display de valores teóricos de los ángulos para cada articulación
4. Display de valores realimentados de los ángulos para cada articulación
5. Bloque principal donde se encuentra el diagrama completo correspondiente al control en alto nivel



Figura 1.7. Interfaz gráfica en MATLAB - Simulink [1]

En la Figura 1.6 se observa el diagrama en Simulink completo del sistema el cual permite que este tenga el comportamiento que se define en el diagrama de flujo ilustrado en la Figura 1.8.

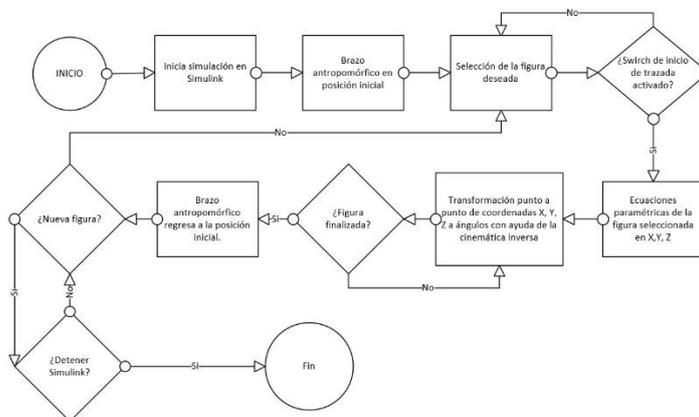


Figura 1.8. Diagrama de flujo del control en alto nivel (Matlab-Simulink) [1]

1.4.2.2 Controlador en bajo nivel

El software diseñado para el control en bajo nivel, comandado por el sistema embebido Arduino Mega, se encarga de iniciar la comunicación de la memoria compartida y la interfaz RS-485 para posteriormente recibir los datos de la memoria compartida en 2 paquetes de datos de 8 bits para ser reconstruidos en uno solo, estos datos son las acciones de control las cuales son enviadas a los motores, a continuación se recibe la posición de los motores, esta información se procesa para tener 2 paquetes de 8 bits, los cuales son enviados del sistema embebido hacia la memoria compartida.

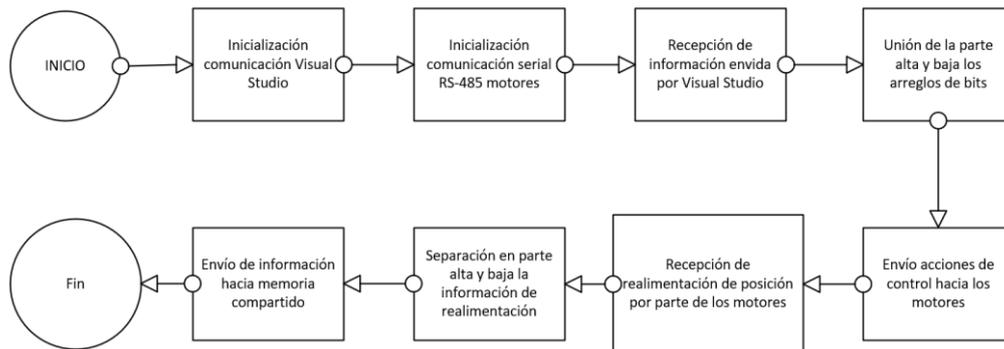


Figura 1.9. Diagrama de flujo del control en bajo nivel (Matlab-Simulink) [1]

1.4.3 MEMORIA COMPARTIDA.

El software encargado de la memoria compartida es el Visual Studio, este software se encarga de crear un puente de comunicación entre el Matlab y el Arduino logrando así la comunicación entre el control en alto y bajo nivel respectivamente, adicionalmente la memoria compartida se encarga del tratamiento de datos, debido a que los softwares en Matlab y Arduino manejan registros de diferentes tamaños se deben fraccionar o unir registros para que estos puedan ser utilizados por los softwares correspondientes. El diagrama de flujo de la memoria compartida se ilustra en la Figura 1.10.

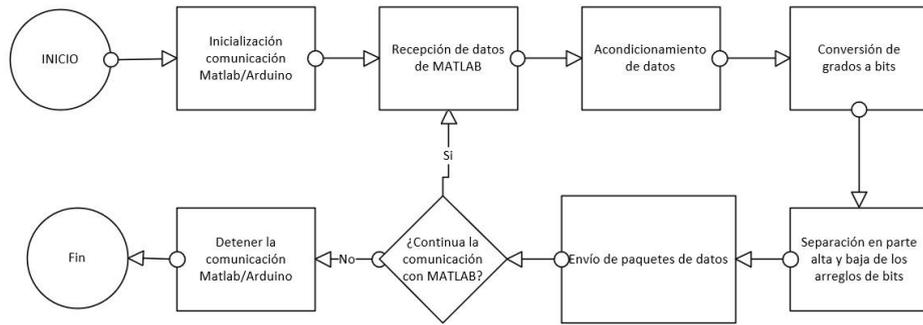


Figura 1.10. Diagrama de flujo de la memoria compartida (Visual Studio) [1]

En el software correspondiente al control en alto nivel mostrado en la Figura 1.6 se tiene el un bloque correspondiente a la memoria compartida que se identifica por tener una figura del brazo robótico en la Figura 1.6. Al ingresar dentro de dicho bloque se despliega un bloque con entradas y salidas definidas con su respectivo tipo de datos como se ilustra en la Figura 1.11.

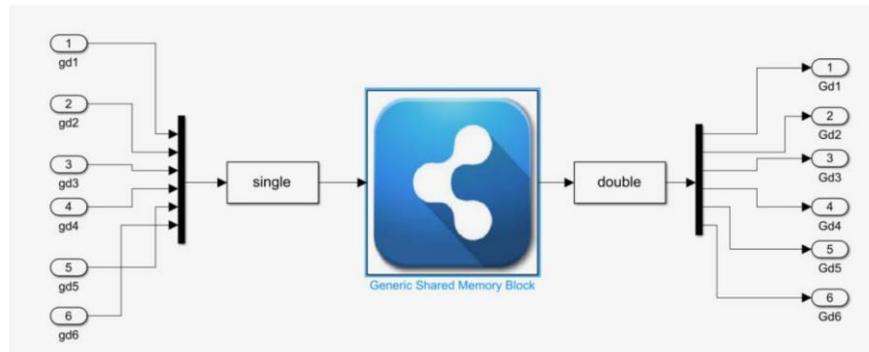


Figura 1.11. Diagrama de bloques correspondiente a la memoria compartida [1]

1.4.4 ACTUADOR.

Ya que uno de los alcances de este proyecto de integración curricular es el ensamblaje de un efector final tipo pinza de 2 dedos, para la operación de este efector final se cuenta con un servomotor Dynamixel MX – 28 R el cual ya se encontraba considerado para este fin en el proyecto de investigación PIMI 14-04.

1.4.4.1 Dynamixel MX-28R

El Dynamixel MX-28R es el servomotor para el efector final, este motor se caracteriza por tener un control de posición de 360 grados sin banda muerta, posee una sensibilidad de 0.088 grados, alta velocidad, tiene controlador PID, lo que lo hace efectivo en aplicaciones relacionadas con la robótica donde se busca la precisión. El servomotor Dynamixel MX-28R se ilustra en la Figura 1.12.



Figura 1.12. Servomotor Dynamixel MX-28R [2]

Las principales características de este motor son:

Alimentación DC: 12 [V]

Transmisor de posición: Encoder absoluto con resolución de 12 bits a 360°

Baud Rate: 4.5 Mbps

Resolución: 4096 pulsos por revolución

Modos de operación:

- Rueda

- Conjunto de 0-360°

- Multivuelta

Velocidad en vacío: 55 revoluciones/minuto

Temperatura de operación: -5 a 80 °C

Conexión:

- RS-485, multipunto TTL;

- Comunicación UART semidúplex TTL de 8 bits, 1 parada sin paridad.

- Comunicación UART RS-485 de 8 bits, 1 parada sin paridad.

Realimentación: posición angular, temperatura, torque de carga y voltaje de entrada.

Corriente de espera: 100 mA

Peso: 72 g

Torque: 2.5 Nm

1.4.5 CINEMÁTICA UTILIZADA EN ROBOTS SIMILARES.

En el ámbito industrial, se emplean diversos manipuladores para una amplia gama de tareas. Entre estos, destacan los brazos robóticos con arquitectura antropomórfica, los cuales varían en cuanto a los grados de libertad. Como un alcance de este trabajo de integración curricular, se aborda el cálculo del modelo cinemático para controlar un robot antropomórfico de 5 GDL, específicamente para llevar a cabo operaciones de paletización. Para lograr este objetivo, es necesario analizar las cinemáticas involucradas en distintos tipos de manipuladores. En particular, se enfoca en aquellos que son relevantes para las tareas de paletización, lo cual incluye la revisión de las cinemáticas utilizadas en varios tipos de robots.

1.4.5.1 Robot ABB IRB 6700 [3]

El robot ABB IRB 6700 es un robot industrial de 6 GDL de alta potencia y rendimiento. Es uno de los robots más vendidos de ABB y se utiliza en una extensa variedad de aplicaciones. Con una capacidad de carga útil de 150 kg a 300 kg y un alcance máximo de 2,6 m a 3,2 m, el IRB 6700 es ideal para tareas como soldadura, paletizado, manipulación de materiales, ensamblaje, mecanizado y pintura.

El robot ABB IRB 6700 utiliza el modelo cinemático directo para calcular la ubicación y sentido de la herramienta a partir de las coordenadas de las articulaciones. Este método se basa en la transformación homogénea, que describe la posición y orientación de un marco de referencia con respecto a otro.

El modelo cinemático del IRB 6700 se compone de los siguientes elementos:

- Parámetros Denavit-Hartenberg: Estos parámetros definen la geometría del robot, como distancia de los eslabones y la rotación entre ellos.
- Matriz de transformación homogénea: Esta matriz describe la ubicación y sentido del extremo del brazo del robot con respecto a la base del robot.
- Ecuaciones cinemáticas: Estas ecuaciones se utilizan para calcular la ubicación y sentido de la herramienta a partir de las coordenadas de las articulaciones.

El modelo cinemático directo del IRB 6700 se puede utilizar para:

- Planificar la trayectoria del robot y evitar colisiones con obstáculos.
- Controlar la posición de la herramienta en tiempo real para realizar tareas con precisión.
- Simular el comportamiento del robot en un entorno virtual.

El IRB 6700 también utiliza un algoritmo del modelo cinemático inverso para calcular las coordenadas de los grados de libertad a partir de la posición y orientación deseada de la herramienta. Este algoritmo se basa en el método de Newton-Raphson. Y esto es utilizado para tareas como:

- Soldadura.
- Paletizado.
- Manipulación de materias.
- Ensamblaje.
- Mecanizado, etc.

En la Figura 1.13 se expone el robot IRB 6700 de la marca ABB.



Figura 1.13. Brazo robótico IRB 6700 [3]

1.4.5.2 Robot KUKA LBR iiwa [4]

El KUKA LBR iiwa es un robot de 7 grados de libertad, con una capacidad de peso efectivo de 7kg y un alcance de 800mm, ideal para la colaboración humano-robot. Es el primer robot certificado para trabajar sin vallado de seguridad, siendo fácil de programar y usar. Sus cualidades lo hacen una opción ideal para diversas tareas como ensamblaje, soldadura, paletizado y más, en industrias como la de automotores, electrónica y aeroespacial.

Para la paletización con el robot KUKA LBR iiwa, se suelen utilizar dos tipos de cinemática:

Cinemática directa:

- Es la técnica más utilizada en general para robots, incluido el LBR iiwa.
- Es relativamente simple de implementar y precisa para calcular la posición y orientación de la herramienta.
- Se fundamenta en una serie de parámetros que definen la geometría del robot.

Cinemática inversa:

- Se usa para obtener los ángulos de las articulaciones necesarias para alcanzar una ubicación y sentido deseada de la herramienta.
- Permite un control más preciso del robot y una mayor flexibilidad en la realización de tareas.
- Es un algoritmo eficiente que se puede ejecutar en tiempo real.

La elección de la cinemática más adecuada para la paletización con el LBR iiwa depende de varios factores:

- Precisión requerida: Si se requiere una alta precisión, la cinemática inversa puede ser la mejor opción.
- Flexibilidad requerida: Si se necesita flexibilidad para realizar diferentes tipos de tareas de paletización, la cinemática inversa puede ser la mejor opción.
- Tiempo de ciclo: Si el tiempo de ciclo es un factor importante, la cinemática directa puede ser la mejor opción, ya que es más simple y rápida de calcular.

En general, la cinemática inversa se suele utilizar para la paletización con el LBR iiwa cuando se requiere una alta precisión y flexibilidad. La cinemática directa se puede utilizar para tareas de paletización más simples donde la precisión y la flexibilidad no son tan importantes. El robot LBR iiwa de la marca KUKA se expone en la Figura 1.14.



Figura 1.14. Brazo robótico LRM iiwa [4]

A partir de los robots consultados, se determinó que el modelo cinemático inverso es la opción preferida para aplicaciones donde se requiera posicionar una herramienta en coordenadas específicas. Este modelo es especialmente adecuado para tareas que demanden una alta precisión y flexibilidad. La cinemática inversa permite obtener las coordenadas de las articulaciones necesarias para alcanzar una ubicación y sentido

deseados de la herramienta, lo que facilita un control preciso del robot y una mayor adaptabilidad en la ejecución de las tareas. Por lo tanto, en el presente trabajo de integración curricular se utilizará la cinemática inversa para el control del robot antropomórfico de 5 GDL para realizar tareas de paletización.

Con la revisión bibliográfica se han establecido las bases conceptuales necesarias para abordar el control de un robot antropomórfico de 5 GDL para tareas de paletización. El siguiente capítulo se enfocará en los pasos concretos que se llevarán a cabo para implementar este control, incluyendo la manufactura del efector final tipo pinza de dos dedos, la adaptación del software de control y el desarrollo de la interfaz de usuario. Estos componentes metodológicos se apoyan en el marco teórico establecido.

2 METODOLOGÍA

En este trabajo de integración curricular se utiliza el método descriptivo, explicativo y experimental, ya que se basa en el trabajo de investigación PIMI 14-04 y en el TIC “Ensamblaje y control de un Robot Antropomórfico de cinco grados de libertad”, de los cuales se obtuvo la información para manufacturar el efector final, como también las bases para realizar los controladores del brazo antropomórfico de 5GDL.

Se realizó la fase teórica en el primer capítulo en base a la revisión bibliográfica del Robot antropomórfico con 5GDL, el control en alto nivel, el control en bajo nivel y la memoria compartida, desarrollados en los trabajos previos, además de eso, se consultó la cinemática que ocupan robots similares para tareas de paletización.

En la fase de diseño, desarrollada en el capítulo 2, se obtuvieron los planos de las piezas de la pinza de dos dedos del proyecto de investigación PIMI 14-04, las cuales fueron manufacturadas para ensamblar el efector final. Asimismo, se llevó a cabo el cálculo de las ecuaciones del modelo cinemático inverso y se desarrolló el software de control necesario para que el robot antropomórfico de 5 GDL pueda realizar tareas de paletización. En el tercer capítulo, se presentan las pruebas suficientes para validar el funcionamiento del robot antropomórfico de 5 GDL al desarrollar tareas de paletización.

2.1 EFECTOR FINAL TIPO PINZA DE DOS DEDOS

Posteriormente a desarrollar la fase teórica se procedió a la manufactura y ensamblaje del efector final tipo pinza de 2 dedos cuyos planos fueron desarrollados en el proyecto de investigación PIMI 14-04 [4], estos planos se encuentran en el Anexo II. Originalmente el diseño mecánico planteaba el aluminio como material de manufactura del efector final, sin embargo, la complejidad y costos de llevar a cabo esta propuesta hizo que se optara por una manufactura híbrida donde se combina piezas de PLA y de acero inoxidable, en la Tabla 2.1 se indica las piezas utilizadas y el material del que fueron manufacturadas.

Tabla 2.1. Pizas manufacturadas del efector final tipo pinza de 2 dedos

Tipo de pieza	N° de veces que se repite	Material en el que se manufacturo
Dedo	2	PLA
Guía	1	Acero Inoxidable
Placa base	1	Acero Inoxidable
Seguidor	2	PLA
Adaptador	1	Acero inoxidable
Leva	2	Acero inoxidable
Palanca	2	Acero inoxidable

Para las 2 palancas el adaptador y las dos levas se utilizó una plancha de acero de 2mm para posteriormente obtenerlas mediante corte laser obteniendo así las piezas expuestas en la Figura 2.1



Figura 2.1. Palanca, adaptador y levas del efector final tipo pinza de 2 dedos.

Para la guía y la placa base se realizó de igual forma mediante un corte laser sin embargo estas piezas poseen pliegues por lo que se los hizo en una dobladora de metal para obtener así las piezas mostradas en la Figura 2.2.

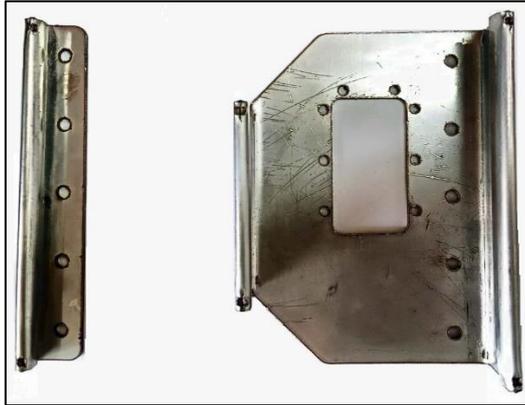


Figura 2.2. Guía y placa base del efector final tipo pinza de 2 dedos.

Únicamente las piezas manufacturadas en PLA fueron los dedos y los seguidores obteniendo el resultado que se ilustra a continuación en la Figura 2.3.

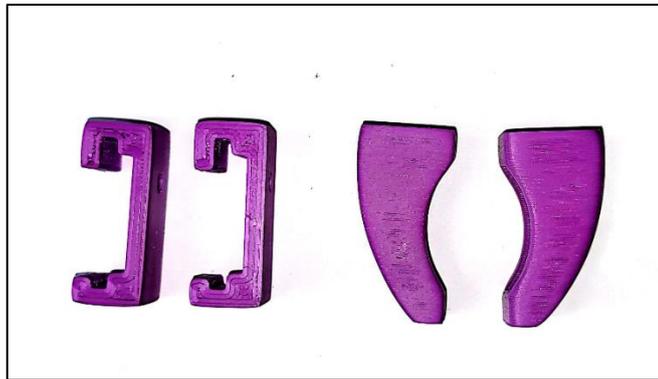


Figura 2.3. Dedos y seguidores del efector final tipo pinza de 2 dedos.

Utilizando los elementos de fijación especificados en los planos del efector final del Anexo II, se logró el ensamblaje de este como se ilustra en la Figura 2.4.

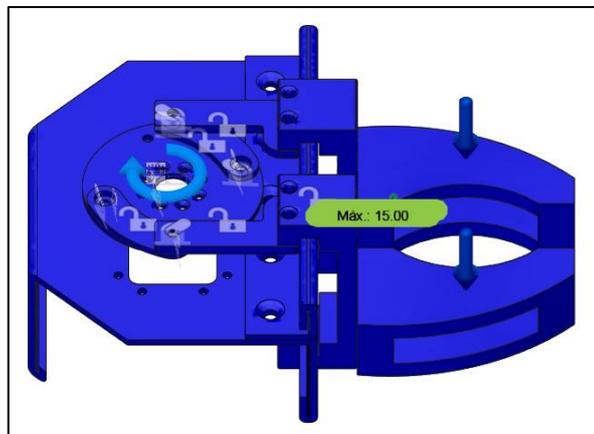


Figura 2.4. Efector final tipo pinza de 2 dedos ensamblado.

Debido a que los materiales con los que se manufacturó la pinza varían con respecto a los considerados en el diseño mecánico, se requiere hacer un estudio de tensión estática, para lo cual se utilizó el software Fusión 360, tomando en consideración que el brazo robótico fue diseñado para levantar un peso de 1500 gramos [5] lo que se traduce en una fuerza de 14.73 Newtons, con estos datos se procedió a realizar diversos estudios, siendo el primero el de factor de seguridad que señala que tan fuerte es la estructura en contraste a las cargas que se le aplica obteniendo los resultados (Figura 2.5).

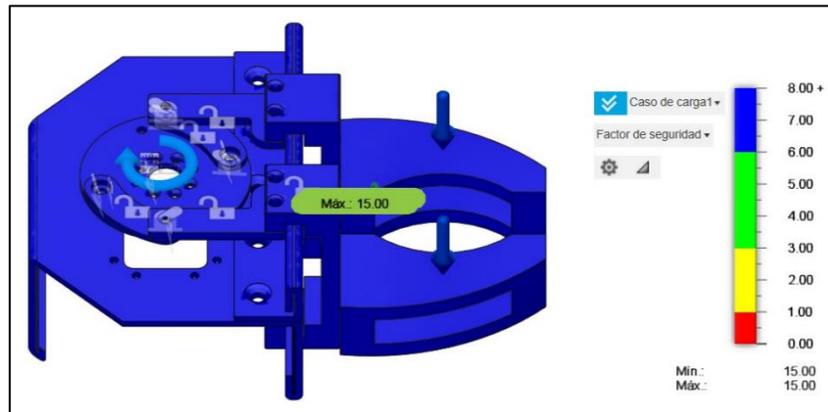


Figura 2.5. Estudio de tensión estática (Factor de seguridad).

En la Figura 2.5. se indica que el factor de seguridad en todo el efector final es mayor a 15, esto quiere decir que la pieza puede soportar más de 15 veces la fuerza aplicada en la simulación que es de 14.73 Newtons [6].

Posterior a este análisis se realizó el estudio de deformación, esto con el objetivo de evidenciar si alguna de las piezas corre el riesgo de deformación ya que las piezas en PLA son propensas a una mayor deformación que las manufacturadas en acero. El estudio de deformación está ilustrado en la Figura 2.6.

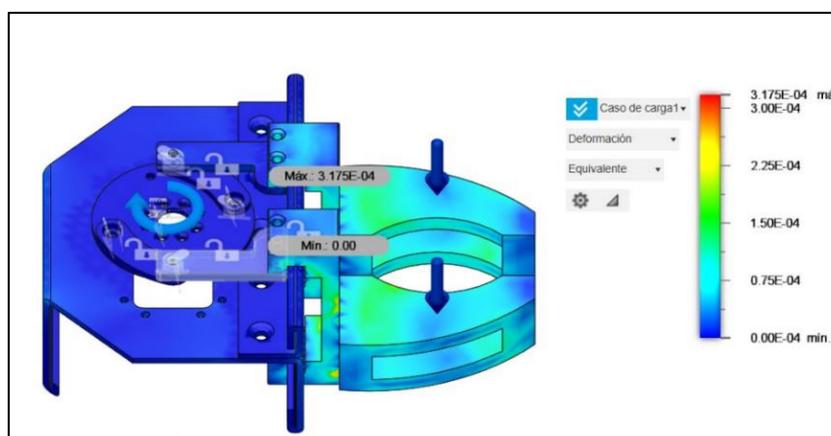


Figura 2.6. Efector final tipo pinza de 2 dedos ensamblado.

Como se evidencia en la Figura 2.6. El análisis de la deformación es lo que se esperaría ya que las piezas más propensas a deformarse son los dedos y los seguidores los cuales están manufacturados en PLA.

Finalmente se realizó el estudio de estrés, el cual busca evidenciar como las cargas externas afectan a la integridad estructural, este estudio está expuesto en la Figura 2.7.

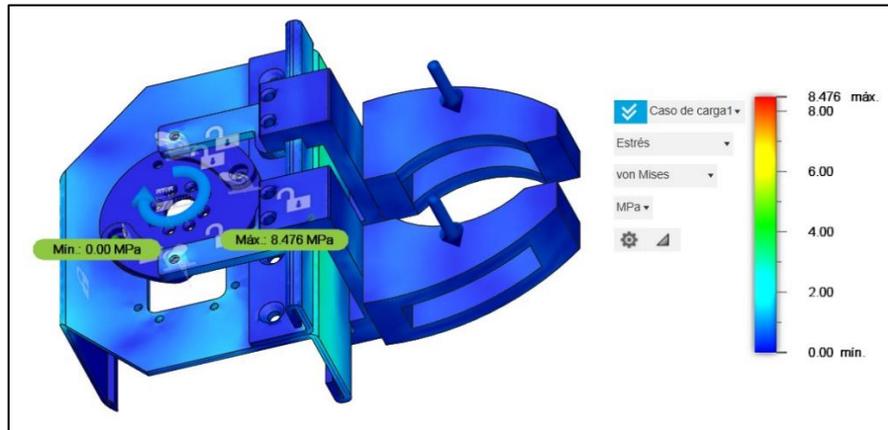


Figura 2.7. Efecto final tipo pinza de 2 dedos ensamblado.

En el estudio de estrés en el efecto final, se logra evidenciar que el máximo estrés que podría soportar la pieza completa se encuentra en la guía, la cual dice que debe soportar un máximo de 8.476 mega pascales, y el acero con un grosor de 2 mm tiene la capacidad de soportar entre 250 y 400 mega pascales [7], por lo que no es problema el estrés para el efecto final.

Debido a los estudios realizados con respecto a la tensión estática se puede concluir que el efecto final manufacturado trabajaría acorde a lo especificado en el diseño, finalmente se acopla mecánicamente el efecto final al Brazo robótico de 5 GDL como está ilustrado en la Figura 2.8.

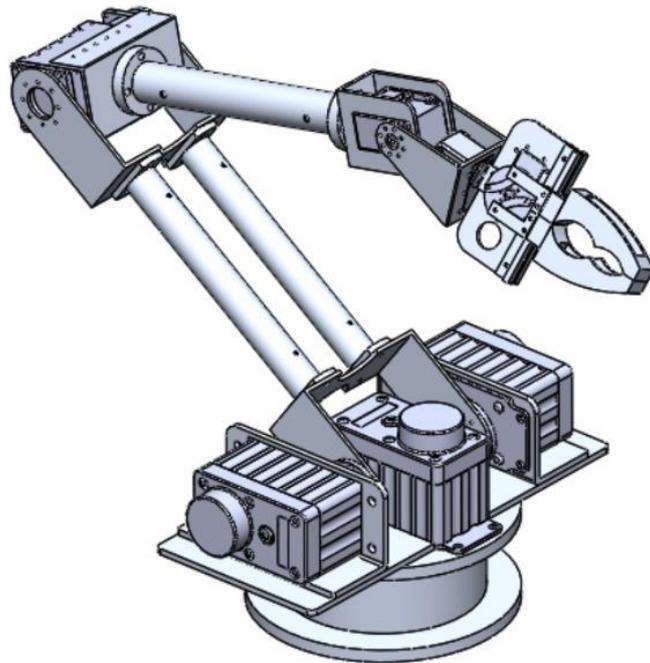


Figura 2.8. Robot Antropomórfico de 5GDL adaptado el efector final tipo pinza de 2 dedos.

2.2 INCORPORACIÓN DEL MOTOR DYNAMIXEL MX28

El efector final es comandado por un motor Dynamixel MX28, por lo que éste tuvo que agregarse a la red RS485 del robot, modificando así el diagrama electrónico realizado previamente, el diagrama electrónico modificado se expone en Figura 2.9.

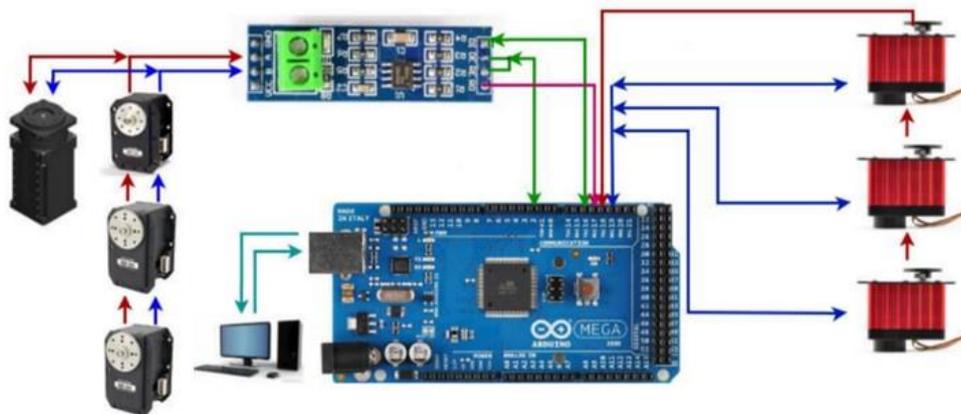


Figura 2.9. Sistema electrónico modificado del Robot Antropomórfico de 5GDL.

Para este efecto se requirió asignarle una dirección al motor, esto se consigue con la ayuda del software Dynamixel Wizard 2.0, el motor debe conectarse al PC mediante el módulo USB2-Dynamixel. Posteriormente en el software se escanea los dispositivos conectados a la computadora buscando el motor, para luego enlazar el software con el motor para

finalmente modificar la dirección ID del motor al número “3” de la red RS-485, aquí también se configura la velocidad de comunicación, en la Figura 2.10 se encuentra ilustrada la configuración del motor mediante el programa Dynamixel Wizard 2.0.

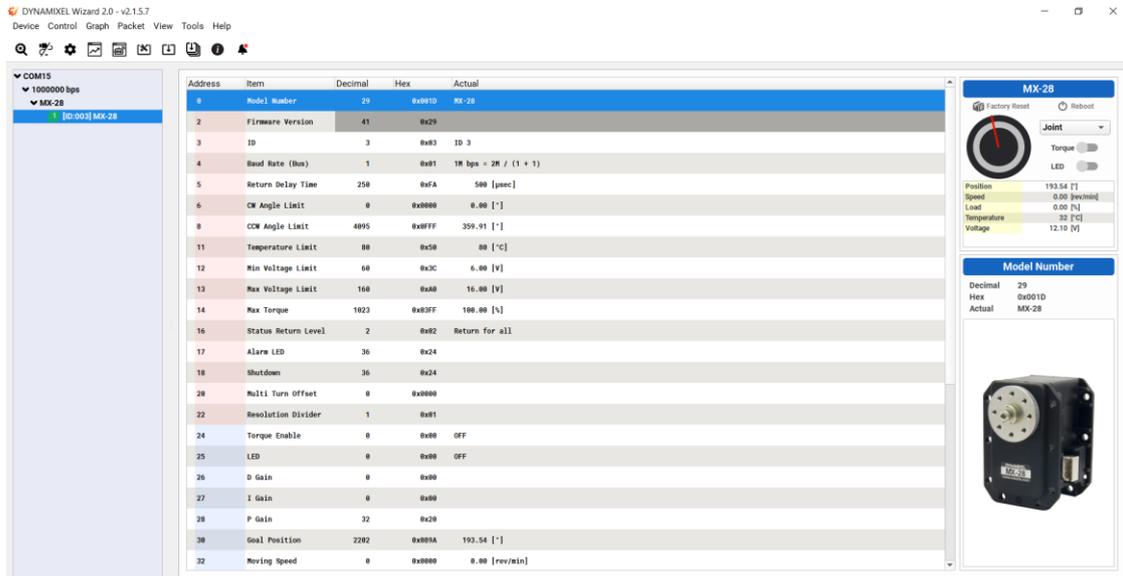


Figura 2.10. Configuración del motor Dynamixel MX28 en el software Dynamixel Wizard 2.0.

Realizando los cambios mencionados anteriormente se tiene la arquitectura del software de control ilustrado en la Figura 2.11.

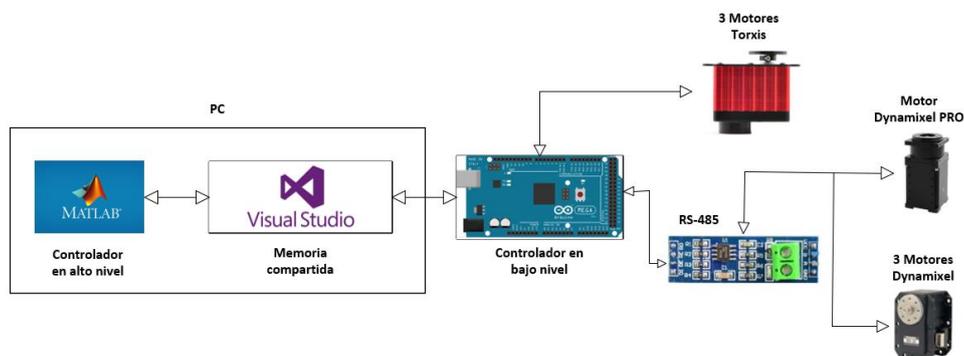


Figura 2.11. Arquitectura de software para el control del robot antropomórfico de 5GDL.

A partir de la arquitectura de la Figura 2.11. se realizó la adaptación de la memoria compartida y el controlador en bajo nivel para añadir un motor Dynamixel adicional a la red, además de realizar un controlador en alto nivel completamente nuevo, el cual es específico para tareas de paletización con el Robot antropomórfico de 5 GDL.

2.3 ADAPTACIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL EN BAJO NIVEL

Las rutinas que sigue el controlador en bajo nivel son similares a las que se indican en el capítulo 1, en el programa en bajo nivel el cual se encuentra comandado por el microcontrolador Arduino Mega se tiene como primera instancia, en el programa principal la inicialización de las librerías y variables necesarias, para posteriormente inicializar la comunicación serial de los motores y comprobar si existe comunicación serial con el computador, si esto último se cumple se lee la trama de datos correspondiente a la posición deseada de los motores que la memoria compartida envía en 2 registros de 8 bits para cada motor, en el microcontrolador estos dos registros se unen en uno solo de 16 bits, el cual es enviado a los motores, a continuación, el microcontrolador recibe la posición desde los motores para almacenarlo en un dato de 16 bits, el cual lo separa en 2 registros de 8 bits para finalmente estos dos registros de realimentación de los motores sean enviados al computador mediante el puerto USART. En la Figura 2.12 se expone el diagrama de flujo que sigue el programa del control en bajo nivel.

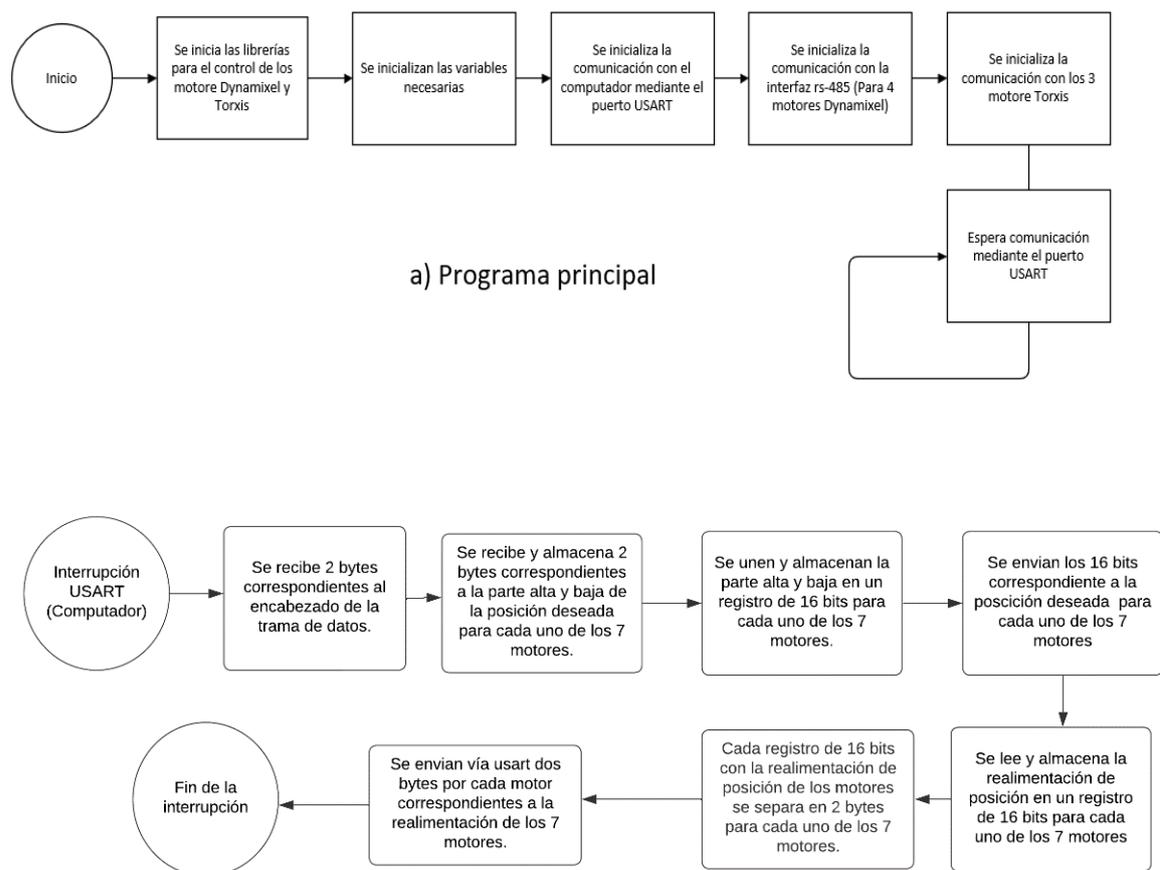


Figura 2.12. Diagrama de flujo del software de control en bajo nivel.

2.4 ADAPTACIÓN DE LA MEMORIA COMPARTIDA

Para adaptar la memoria compartida se siguió una estructura similar a la explicada en el capítulo 1. En primer lugar se inicia la comunicación serial con el Arduino y Simulink para posteriormente iniciar la memoria compartida en el propio Simulink, una vez iniciada la memoria compartida esta lee los datos recibidos del controlador en alto nivel, el cual se encuentra en el programa de Simulink, transformando los grados adquiridos del Simulink a bits para luego separarlo en 2 registros de 8 bits (por cada motor) y estos enviarlos por vía serial al controlador en bajo nivel comandado por el Arduino. De forma similar para obtener los datos de realimentación de los motores se reciben dos registros de 8 bits (por cada motor) vía serial desde el Arduino para luego compactar estos datos y posteriormente transformarlos de bits a grados y así enviar la realimentación de posición de los motores al controlador en alto nivel. En la Figura 2.13 se encuentra ilustrado el diagrama de flujo correspondiente a la lógica que sigue la memoria compartida.

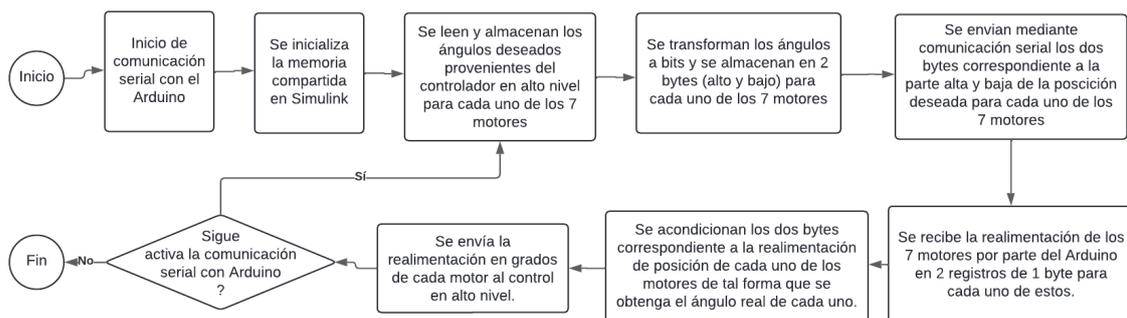


Figura 2.13. Diagrama de Flujo de la memoria compartida implementada.

2.5 CINEMÁTICA INVERSA DEL ROBOT CON ARQUITECTURA ANTROPOMÓRFICA DE 5 GDL

Como se explicó en el primer capítulo el método de control más utilizado para tareas de paletización es mediante la cinemática inversa, donde el modelo calcula los ángulos a través de las posiciones XYZ deseadas del efector final, debido a la naturaleza de la aplicación se ha decidido que el efector final se posicione perpendicular al plano XY y que los dos dedos de la pinza se encuentren en paralelo al eje de coordenadas Y, por lo que para este efecto se obtuvo el modelo cinemático inverso hasta el tercer eslabón y para los eslabones 4 y 5 se realizó un modelo geométrico. En la Figura 2.14 se indican la dirección de los ejes como también los ángulos y rotaciones correspondientes a cada articulación.

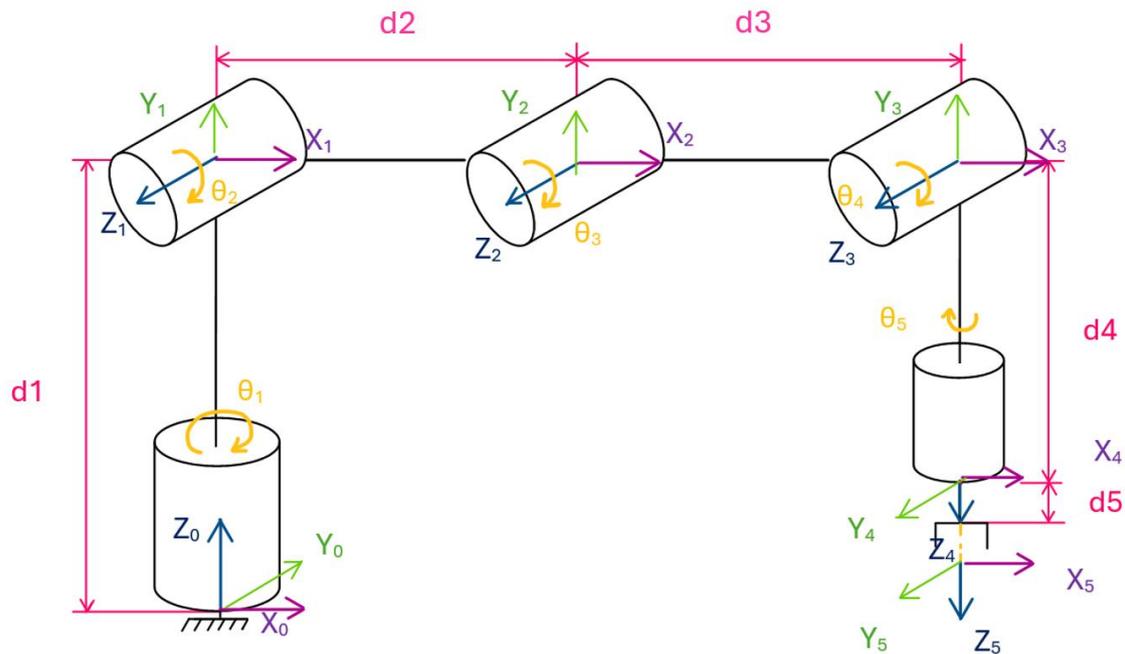


Figura 2.14. Esquema del robot antropomórfico de 5 GDL.

2.5.1 Cálculo de las ecuaciones de los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 .

Para obtener las ecuaciones de los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 se hace uso del algoritmo de Denavit-Hartenber, este algoritmo considera que en primer lugar se debe obtener el modelo cinemático directo, para eso se obtienen los parámetros Denavit-Hartenber. En la Tabla 2.2 se indican los parámetros DH del Robot antropomórfico con 5 GDL

Tabla 2.2. Parámetros DH del Robot antropomórfico de 5 GDL

# Eslabón	θ	d	α	a
1	θ_1	d_1	90	0
2	θ_2	0	α_2	d_2
3	θ_3	0	α_3	d_3
4	θ_4	0	90	0
5	θ_5	$d_4 + d_5$	α_5	0

A partir de la matriz de transformación homogénea general [8]:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Se adquieren las matrices de transformación homogénea para cada uno de los eslabones;

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & d_2 * \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & d_2 * \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & d_3 * \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & d_3 * \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 + d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Con estas matrices se puede encontrar todas las matrices homogéneas correspondientes a cada una de las articulaciones con respecto a la base, como se desea obtener hasta el ángulo Θ_3 es decir hasta la tercera articulación, la matriz homogénea resultante es de la siguiente forma:

$$A_3^0 = A_1^0 * A_2^1 * A_3^2 \quad (2.7)$$

$$(A_1^0)^{-1} * A_3^0 = A_2^1 * A_3^2 \quad (2.8)$$

Definiendo la matriz A_3^0 :

$$A_3^0 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & X_3^0 \\ n_y & o_y & a_y & Y_3^0 \\ n_z & o_z & a_z & Z_3^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Y reemplazando las matrices en la ecuación 2.1 se tiene que:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & X_3^0 \\ n_y & o_y & a_y & Y_3^0 \\ n_z & o_z & a_z & Z_3^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & d_2 * \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & d_2 * \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & d_2 * \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & d_2 * \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)
\end{aligned}$$

Operando ambos lados de la ecuación 2.9:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} C_1 n_x + n_y S_1 & C_1 o_x + o_y S_1 & a_x C_1 + a_y S_1 & X C_1 + Y S_1 \\ n_z & o_z & a_z & Z - d_1 \\ n_x S_1 - n_y C_1 & o_x S_1 - o_y C_1 & a_x S_1 - a_y C_1 & X * S_1 - Y C_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
& \begin{bmatrix} C_2 C_3 - S_2 S_3 & -C_2 S_3 - C_3 S_2 & 0 & d_2 c_2 + d_3 C_2 C_3 - d_3 S_2 S_3 \\ C_2 S_3 + C_3 S_2 & C_2 C_3 + S_2 S_3 & 0 & d_2 s_2 + d_3 C_2 S_3 + d_3 C_3 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)
\end{aligned}$$

Donde:

$$C_1 = \cos \theta_1 \quad S_1 = \sin \theta_1$$

$$C_2 = \cos \theta_2 \quad S_2 = \sin \theta_2$$

$$C_3 = \cos \theta_3 \quad S_3 = \sin \theta_3$$

Para obtener Θ_1 , de la ecuación 2.10 se iguala el elemento (1 3) de la matriz a ambos lados de la ecuación:

$$X * \sin \theta_1 - Y * \cos \theta_1 = 0 \quad (2.12)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (2.13)$$

Con el elemento (1 4) y el elemento (2 4) de las matrices de la ecuación 2.11 se obtienen las ecuaciones 2.14 y 2.15 respectivamente:

$$X * \cos \theta_1 - Y * \sin \theta_1 = d_3 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + d_2 * \cos(\theta_2) \quad (2.14)$$

$$Z = d_3 * \sin(\theta_2 + \theta_3) + d_2 \sin \theta_2 \quad (2.15)$$

Con las ecuaciones 2.14 y 2.15 se obtiene Θ_2 y Θ_3 :

$$S_3 = \sqrt{1 - \left(\frac{X^2 + Y^2 + (Z - d_1)^2 - d_2^2 - d_3^2}{2d_2 d_3} \right)} \quad (2.16)$$

$$C_3 = \frac{X^2 + Y^2 + (Z - d_1)^2 - d_2^2 - d_3^2}{2 * d_2 * d_3} \quad (2.17)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{S_3}{C_3} \quad (2.18)$$

$$S_2 = \frac{(d_2 + d_3 * C_3) * (Z - d_1) - d_3 * S_3 * \sqrt{X^2 + Y^2}}{X^2 + Y^2 + (Z - d_1)^2} \quad (2.19)$$

$$C_2 = \frac{(d_2 + d_3 * C_3) * \sqrt{X^2 + Y^2} + d_3 * S_3 * (Z - d_1)}{X^2 + Y^2 + (Z - d_1)^2} \quad (2.20)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{S_2}{C_2} \quad (2.21)$$

2.5.2 Cálculo de las ecuaciones de los ángulos θ_4 y θ_5 .

Para los ángulos de las articulaciones θ_4 y θ_5 se realiza un análisis geométrico ya que debido a la naturaleza de la aplicación se desea que el efector final este siempre perpendicular al plano XY y paralelo al eje de coordenadas Y. Para este fin se realiza un análisis en el plano XZ para obtener el ángulo θ_4 . En la Figura 2.15 se encuentra ilustrado el diagrama del robot con la perspectiva XZ.

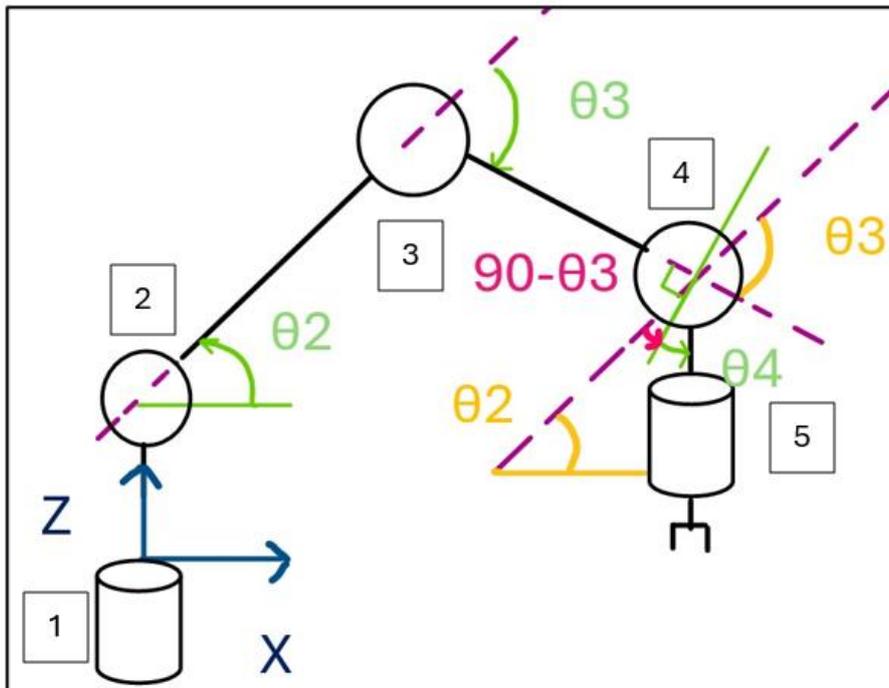


Figura 2.15. Esquema del robot antropomórfico de 5 GDL (perspectiva XZ).

Del análisis geométrico de la Figura 2.15 se obtiene la siguiente relación de los ángulos:

$$90 - \theta_3 + \theta_4 + \theta_2 = 90 \quad (2.22)$$

$$\theta_4 = \theta_3 - \theta_2 \quad (2.23)$$

De manera similar para obtener Θ_4 se analiza la perspectiva XY del diagrama del robot. En la Figura 2.16 se indica el análisis geométrico del robot antropomórfico de 5GDL en el plano XY.

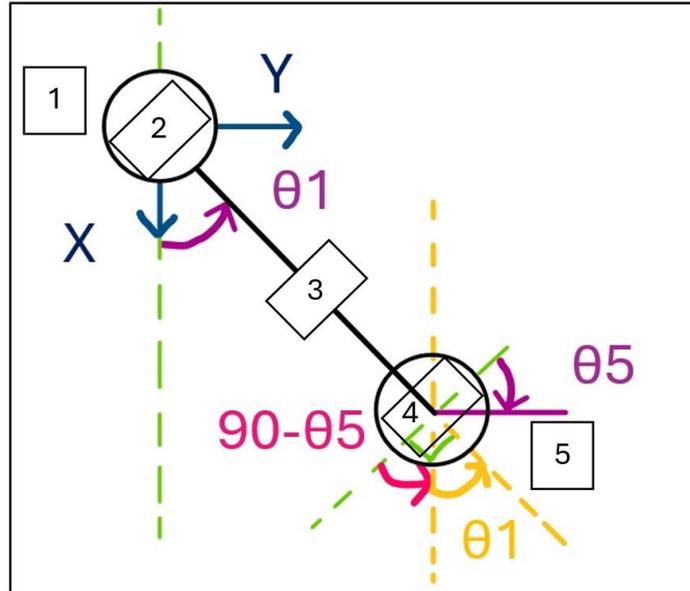


Figura 2.16. Esquema del robot antropomórfico de 5 GDL (perspectiva XY).

De la Figura 2.16 se obtiene la relación entre ángulos para obtener Θ_5 :

$$90 - \theta_5 + \theta_1 = 90 \quad (2.24)$$

$$\theta_5 = \theta_1 \quad (2.25)$$

Dado que las ecuaciones de Θ_1 , Θ_2 y Θ_3 ya se obtuvieron anteriormente y como Θ_4 y Θ_5 de estos, también ya se pueden obtener sus ecuaciones para así obtener el modelo cinemático inverso del Robot Antropomórfico de 5GDL que es el que se implementó en el controlador en alto nivel en conjunto con el HMI.

2.6 CONTROL EN ALTO NIVEL.

La interfaz gráfica, la cual es el control en alto nivel, posee un campo para agregar una posición inicial que corresponde al lugar donde se toma el objeto a paletizar y una posición final la cual es la ubicación donde el objeto va a ser dejado, esta secuencia se activa

mediante un interruptor en el HMI. En la Figura 2.17 se tiene el panel frontal de la interfaz de usuario. Los elementos que posee el panel frontal del HMI son:

- Encender/Apagar: este es un interruptor que inicia la secuencia de paletización al encenderse y deja en condiciones iniciales al robot al apagarse.
- Posición inicial: Consta de tres parámetros de ingreso los cuales cuentan con la posición en X, Y y Z para el inicio de la paletización.
- Posición Final: Consta de tres parámetros de ingreso los cuales cuentan con la posición en X, Y y Z para el punto final de la paletización.
- Ángulos posición inicial: Son los ángulos para cada grado de libertad y el efector final que se obtiene de la cinemática inversa correspondientes al punto inicial.
- Ángulos posición final: Son los ángulos para cada grado de libertad y el efector final que se obtiene de la cinemática inversa correspondientes al punto final.
- Ángulos enviados: Son los ángulos para cada grado de libertad y el efector final que se están enviando en ese momento al robot.
- Ángulos realimentados: Son los ángulos correspondientes a la realimentación para cada uno de los grados de libertad y el efector final.
- Sub-sistema Brazo: Es la máscara del subsistema en simulink donde se encuentra toda la lógica de control, cinemática inversa y secuencia de operación para realizar tareas de paletización.



Figura 2.17. Interfaz de usuario para tareas de paletización.

Dentro de la máscara correspondiente al “Sub-sistema Brazo” se tiene la lógica de control en diagrama de bloques correspondiente al control en alto nivel además la inclusión de la

memoria compartida. En la Figura 2.18 se encuentra expuesto el diagrama de bloques correspondiente al bloque de “sub-sistema Brazo”.

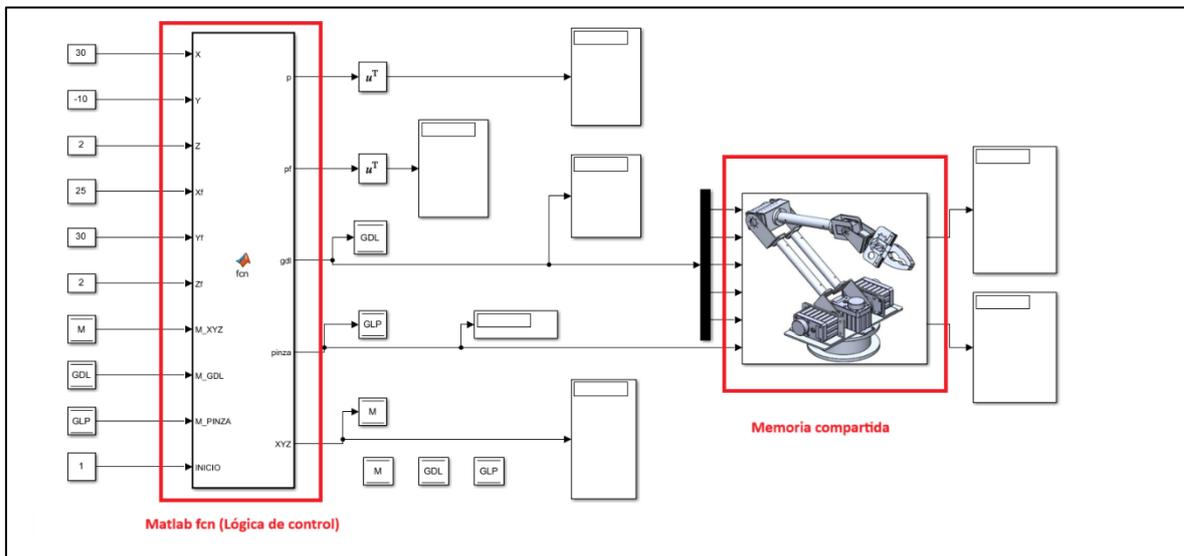


Figura 2.18. Diagrama en Simulink “subsistema Brazo”.

En el diagrama de bloques correspondiente al “Subsistema Brazo”, indicado en la Figura 2.18 muestra dos bloques fundamentales el Matlab fcn y la memoria compartida que se detallan a continuación:

Matlab fcn:

Este bloque posee internamente le cinemática inversa del robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL por lo que tiene como parámetros de ingreso:

- “X”: La posición en X del punto inicial de la paletización.
- “Y”: La posición en Y del punto inicial de la paletización.
- “Z”: La posición en Z del punto inicial de la paletización.
- “Xf”: La posición en X del punto final de la paletización.
- “Yf”: La posición en Y del punto final de la paletización.
- “Zf”: La posición en Z del punto final de la paletización.
- “M_XYZ”: Una memoria que se encarga de almacenar la posición inicial y final de la paletización en el instante de que el botón “Encendido/Apagado” se encienda para que estas no puedan ser cambiadas en medio de una secuencia.

- “M_GLD”: Una memoria que almacena en tiempo real el valor angular que se envía a cada uno de los motores.
- “M_Pinza”: Es una memoria que almacena en tiempo real el ángulo que se envía al motor del efector final.
- “INICIO”: Es el permisivo que inicia o detiene la secuencia de paletización según el estado del interruptor “Encendido/Apagado”.

Con estos parámetros de entrada, se logra la secuencia de control, así como el cálculo de los ángulos necesarios para llegar a las posiciones en XYZ deseadas. Los parámetros de salida del bloque Matlab fcn son:

- “p”: Es un arreglo de 6 datos que son los ángulos necesarios para alcanzar la posición inicial deseada los cuales se obtienen a partir de la cinemática inversa.
- “pf”: Es un arreglo de 6 datos que son los ángulos necesarios para alcanzar la posición final deseada los cuales se obtienen a partir de la cinemática inversa.
- “gdl”: Es un arreglo de 6 datos que corresponden a los ángulos que se están enviando en ese momento a cada uno de los motores del robot.
- “pinza”: es el ángulo que se está enviando en ese momento al motor del efector final.
- “XYZ”: Es un arreglo con la posición inicial y final deseada, que se almacenan en una memoria para ayudar con la secuencia de paletización.

Memoria compartida:

El bloque de “Memoria compartida” que se expone en la Figura 2.19 tiene como parámetros de entrada los ángulos deseados para cada uno de los motores y como salida la realimentación de estos ángulos enviadas por los motores hacia la memoria compartida. El funcionamiento de este bloque se especifica en el subcapítulo “Adaptación de la memoria compartida”.

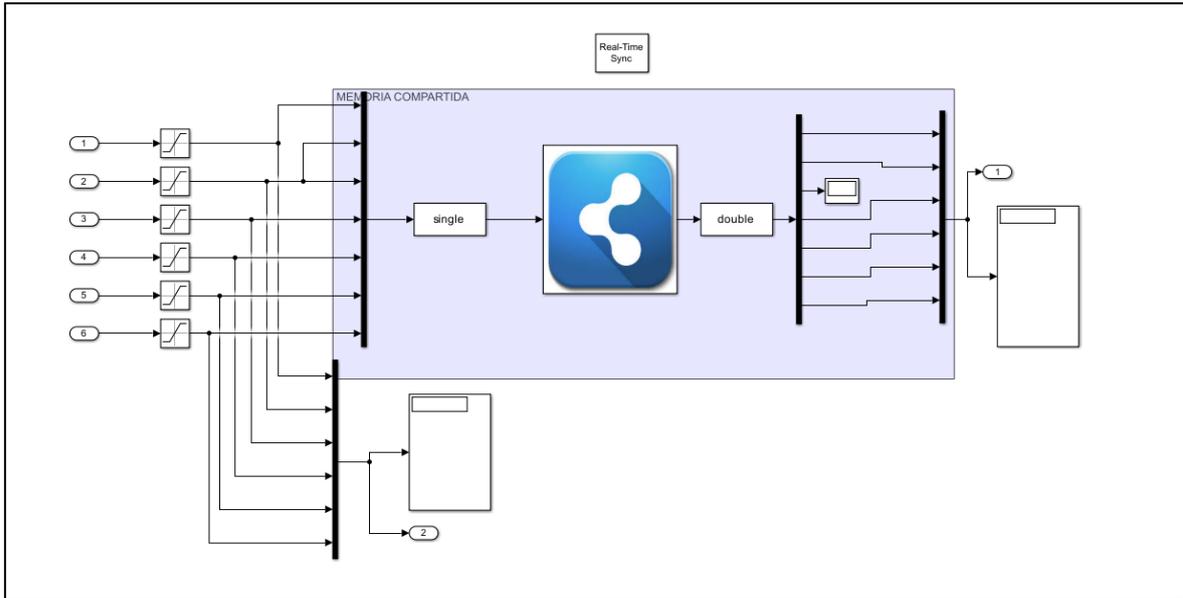


Figura 2.19. Estructura interna del bloque “Memoria compartida” en Simulink.

2.7 HOJA GUÍA PRACTICA DE PALETIZACIÓN

Como parte de los alcances de este trabajo se propuso realizar una hoja guía para una práctica de laboratorio sobre “Paletización con el robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL PIMI-14-04 (Cinemática inversa).” La hoja guía sigue la estructura que utiliza la Carrera en Electrónica y Automatización por lo cual cuenta con [9]:

- **Objetivos:**

Para plantear los objetivos de la hoja guía, se consideró la importancia de desarrollar un modelo cinemático inverso preciso para el robot PIMI 14-04 y validar este modelo con la realización de tareas de paletización. Los objetivos para la hoja guía son los siguientes:

- Obtener el modelo cinemático inverso de un robot PIMI-14-04.
- Validar el modelo cinemático inverso mediante la comparación de las coordenadas cartesianas del modelo con las del robot real en una determinada posición.
- Demostración del funcionamiento de una interfaz para tareas de paletización con un robot PIMI-14-04.

- **Marco teórico:**

El marco teórico de la hoja guía se estructuró para proporcionar una base sólida sobre la cinemática inversa del robot antropomórfico de 5 GDL PIMI 14-04 que se va a utilizar en la práctica de laboratorio. Se describe la relación entre las coordenadas del efector final y los ángulos de cada articulación mediante el uso del algoritmo de Denavit-

Hartenberg (D-H). Este algoritmo emplea matrices de transformación homogénea para establecer el modelo cinemático a partir de la ubicación del sistema de referencia en cada articulación, identificando sus eslabones y dimensiones. Además, se presenta un esquema del robot y se detallan las dimensiones de sus componentes principales, proporcionando así un marco de referencia integral para la realización de los objetivos prácticos.

- Preguntas del trabajo preparatorio:

El trabajo preparatorio cuenta con preguntas esenciales para el funcionamiento del robot PIMI 14-04 para tareas de paletización. Donde en primer lugar es necesario que el estudiante realice el modelo cinemático inverso ya que el control del robot se basa en este modelo para poder obtener las posiciones de paletización deseadas. Las preguntas del trabajo preparatorio asociadas al cálculo del modelo cinemático son:

- Determinar el modelo cinemático inverso de los primeros 3 grados de libertad (Θ_1 , Θ_2 , Θ_3) del robot PIMI-14-04 (Descrito en el marco teórico) mediante Denavit-Hartenberg.
- Determinar el modelo cinemático inverso de los grados de libertad 4 y 5 (Θ_4 y Θ_5).

Como también resulta importante que el estudiante se familiarice con la puesta en marcha del robot PIMI 14-04, se incluyó en el trabajo preparatorio lo siguiente:

- Consultar y realizar un resumen del “Manual de usuario para paletización con el robot antropomórfico de 5 GDL PIMI-14-04”
- Tomando en cuenta las consideraciones del manual de usuario realizar un script donde se ingrese la cinemática inversa obtenida. Nombrar el script como “CinemáticaInversa.m”.

Con los ítems a realizar en el trabajo preparatorio el estudiante debería tener los conocimientos previos necesarios para realizar la práctica de paletización con el robot PIMI 14-04.

- Desarrollo:

En el desarrollo se contempla actividades de demostración del HMI elaborado en este TIC:

- El instructor dará una introducción acerca de la paletización con el robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL y una demostración de su funcionamiento utilizando la interfaz gráfica.

Luego de la demostración es necesario que el estudiante integre la parte realizada en el trabajo preparatorio para lograr que el robot PIMI 14-04 realice tareas de paletización:

- El script desarrollado en el literal 4.4. copie a la carpeta "Programas Paletización"
- Se comprobará el modelo cinemático inverso realizado mediante pruebas de funcionamiento.
- Informe:

Las preguntas para el informe están estructuradas de tal forma que se puedan validar los resultados obtenidos en el desarrollo:

- Realizar un resumen del procedimiento realizado en la práctica, adjuntando el modelo cinemático inverso del robot PIMI-14-04 (código de Matlab) y las capturas de pantalla de la interfaz de usuario cuando se realizaron las mediciones.
- Realizar el cálculo de errores de ángulos, en caso de que existan diferencias significativas justifique lo ocurrido.
- Realizar el cálculo de errores de posiciones en XYZ, en caso de que existan diferencias significativas justifique lo ocurrido.
- Conclusiones (Individuales).
- Recomendaciones (Individuales).
- Bibliografía

La hoja desarrollada se presenta en el Anexo III. Esta hoja guía será utilizada como referencia para realizar las pruebas en el próximo capítulo.

Adicionalmente se realizó una segunda hoja guía para el laboratorio con el objetivo que el estudiante ahonde en el tema de cinemática inversa, esta hoja se realizó acorde a los requerimientos del profesor de la asignatura Robótica de la Carrera en Electrónica y Automatización. La hoja guía desarrollada se presenta en el Anexo III.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, así como las conclusiones derivadas del análisis de dichos resultados y las recomendaciones para futuros trabajos. Se detallan los procedimientos seguidos y los resultados documentados en las pruebas de paletización, se analizan los errores encontrados y se discuten las implicaciones de estos hallazgos. Además, se incluye un análisis de repetibilidad del sistema y se plantean recomendaciones enfocadas en mejorar y ampliar el alcance del proyecto en futuros desarrollos.

3.1 RESULTADOS

Para validar los resultados, se siguió el procedimiento especificado en la hoja guía de la práctica de paletización. Se verificó que mediante el HMI se puede paletizar una esfera de 2 cm de diámetro desde una posición inicial deseada a otra final utilizando la cinemática inversa calculada.

3.1.1 Procedimiento y resultados documentados

Primero, se ingresa en el HMI la posición inicial deseada $X=40$, $Y=15$ y $Z=1.5$ y la posición final $X=25$, $Y=-30$ y $Z=2$ lo cual se observa en la Figura 3.1.



Figura 3.1. HMI con posición inicial deseada $X=40$, $Y=15$ y $Z=1.5$ y la posición final $X=25$, $Y=-30$ y $Z=2$

Luego, se coloca la esfera en la posición inicial deseada (Figura 3.2.).

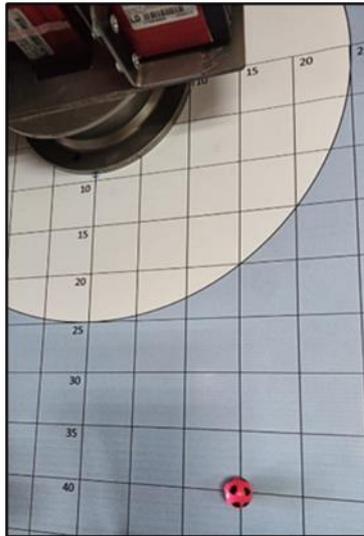


Figura 3.2. Esfera en la posición inicial deseada $X=40$, $Y=15$ y $Z=1.5$

Se enciende el interruptor del HMI y se empieza a enviar a los motores los ángulos calculados por la cinemática inversa para alcanzar la posición inicial (Figura 3.3.).



Figura 3.3. HMI enviando los ángulos para alcanzar la posición inicial deseada $X=40$, $Y=15$ y $Z=1.5$

Como se ve en la Figura 3.4. el efector final del brazo alcanza la posición inicial deseada y el efector final cierra para sujetar la esfera.

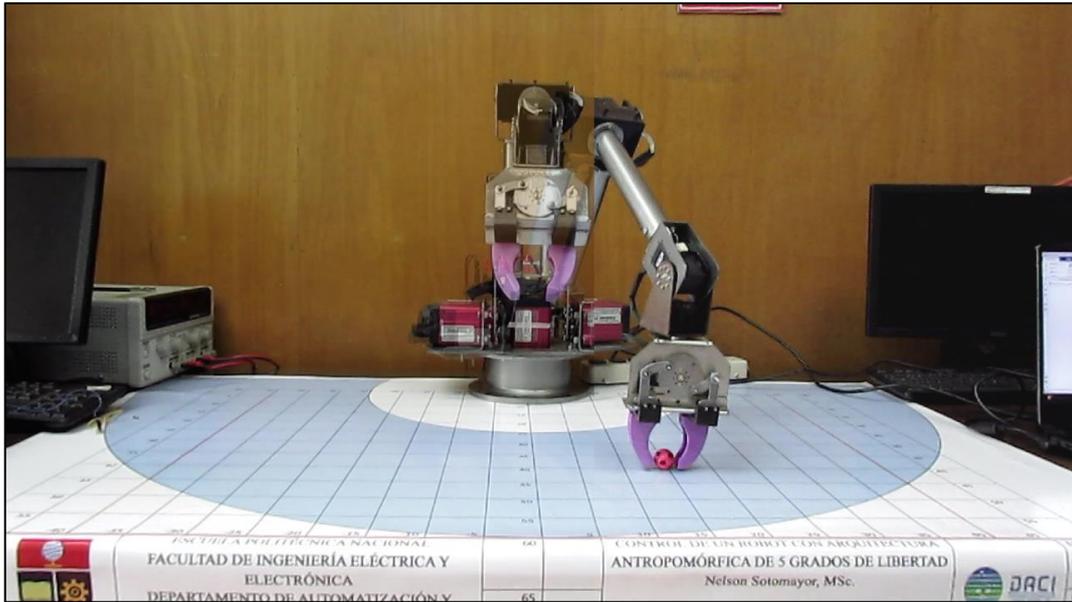


Figura 3.4. Efector final en la posición inicial deseada $X=40$, $Y=15$ y $Z=1.5$

Después, se envía a los motores del brazo los ángulos calculados por la cinemática inversa para alcanzar la posición final deseada como se expone en la Figura 3.5 y Figura 3.6.



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
 Robot Antropomórfico de 5 grados de libertad
 CONTROL POR PALETIZACIÓN



	<p>POSICIÓN INICIAL</p> <p>X <input type="text" value="40"/></p> <p>Y <input type="text" value="15"/></p> <p>Z <input type="text" value="1.5"/></p>	<p>ÁNGULOS POSICIÓN INICIAL</p> <p>21</p> <p>60</p> <p>-95</p> <p>35</p> <p>21</p> <p>142</p>		<p>ÁNGULOS ENVIADOS</p> <p>-50</p> <p>66</p> <p>-103</p> <p>38</p> <p>-50</p> <p>170</p>		<p>ÁNGULOS REALIMENTADOS</p> <p>-49.8803</p> <p>67.6095</p> <p>-102</p> <p>37.6200</p> <p>-48.3626</p> <p>163.9560</p>
	<p>POSICIÓN FINAL</p> <p>X <input type="text" value="25"/></p> <p>Y <input type="text" value="-30"/></p> <p>Z <input type="text" value="2"/></p>	<p>ÁNGULOS POSICIÓN FINAL</p> <p>-50</p> <p>66</p> <p>-103</p> <p>38</p> <p>-50</p> <p>170</p>				




Figura 3.5. HMI enviando los ángulos para alcanzar la posición final $X=25$, $Y=-30$ y $Z=2$

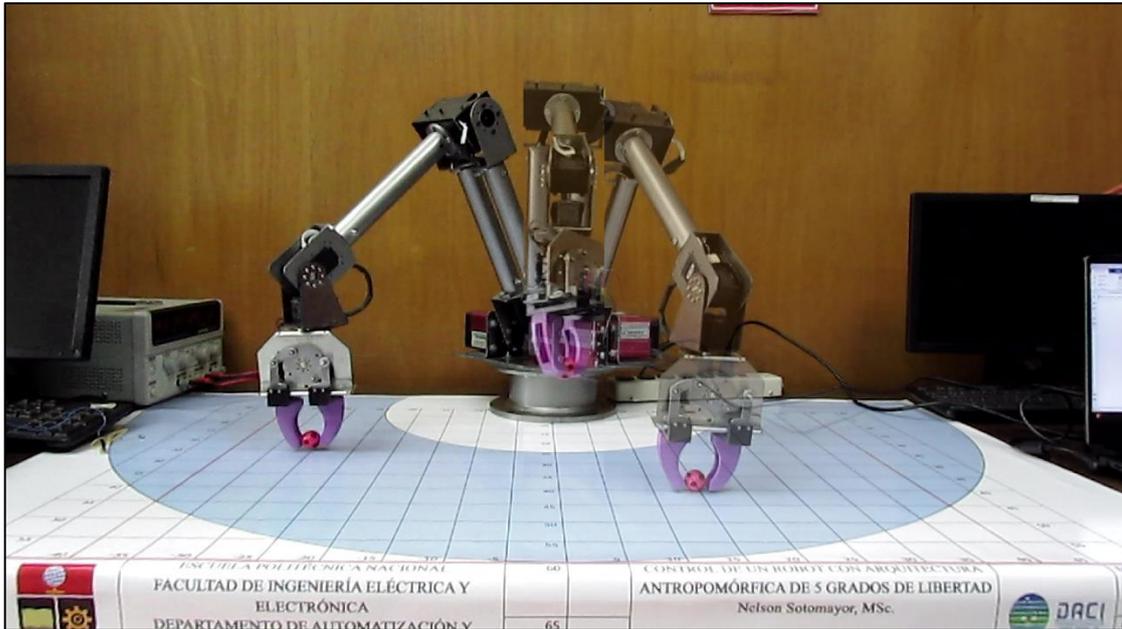


Figura 3.6. Efector final en la posición final $X=25$, $Y=-30$ y $Z=2$

Luego, el brazo regresa a su posición inicial y se debe apagar el interruptor. Se puede realizar una segunda prueba ingresando la posición inicial deseada $X=35$, $Y=-20$ y $Z=1.5$ y la posición final $X=10$, $Y=35$ y $Z=1.5$ lo cual se expone en la Figura 3.7.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Robot Antropomórfico de 5 grados de libertad
CONTROL POR PALETIZACIÓN



POSICIÓN INICIAL

X

Y

Z

POSICIÓN FINAL

X

Y

Z

ÁNGULOS POSICIÓN INICIAL

-30

63

-101

37

-30

142

ÁNGULOS POSICIÓN FINAL

74

69

-109

40

74

170

ÁNGULOS ENVIADOS

0

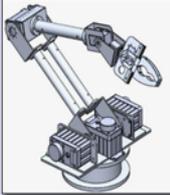
90

-100

45

0

170



ÁNGULOS REALIMENTADOS

-0.0726

90.4063

-99

44.4600

-0.0989

164.2198

Constant Value On

ENCENDIER/APAGAR

Off

Figura 3.7. HMI con posición inicial deseada $X=35$, $Y=-20$ y $Z=1.5$ y la posición final $X=10$, $Y=35$ y $Z=1.5$.

Luego, se coloca la esfera en la posición inicial deseada (Figura 3.8.).

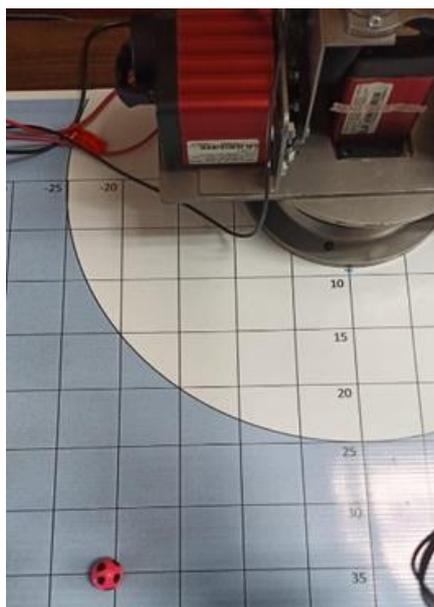


Figura 3.8. Esfera en la posición inicial deseada $X=35$, $Y=-20$ y $Z=1.5$

Se enciende el interruptor del HMI y se empieza a enviar a los motores los ángulos calculados por la cinemática inversa para alcanzar la posición inicial de la segunda prueba como se ve en las Figuras 3.9. y 3.10.



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Robot Antropomórfico de 5 grados de libertad
CONTROL POR PALETIZACIÓN



POSICIÓN INICIAL

X

Y

Z

POSICIÓN FINAL

X

Y

Z

ÁNGULOS POSICIÓN INICIAL

-30
63
-101
37
-30
142

ÁNGULOS POSICIÓN FINAL

74
69
-109
40
74
170

ÁNGULOS ENVIADOS

74
69
-109
40
74
170

ÁNGULOS REALIMENTADOS

74.0546
70.5066
-109
39.6000
71.2857
164.0440

Constant Value On



Off

ENCENDER/APAGAR

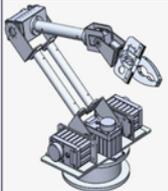


Figura 3.9. HMI enviando los ángulos para alcanzar la posición inicial deseada $X=35$, $Y=-20$ y $Z=1.5$

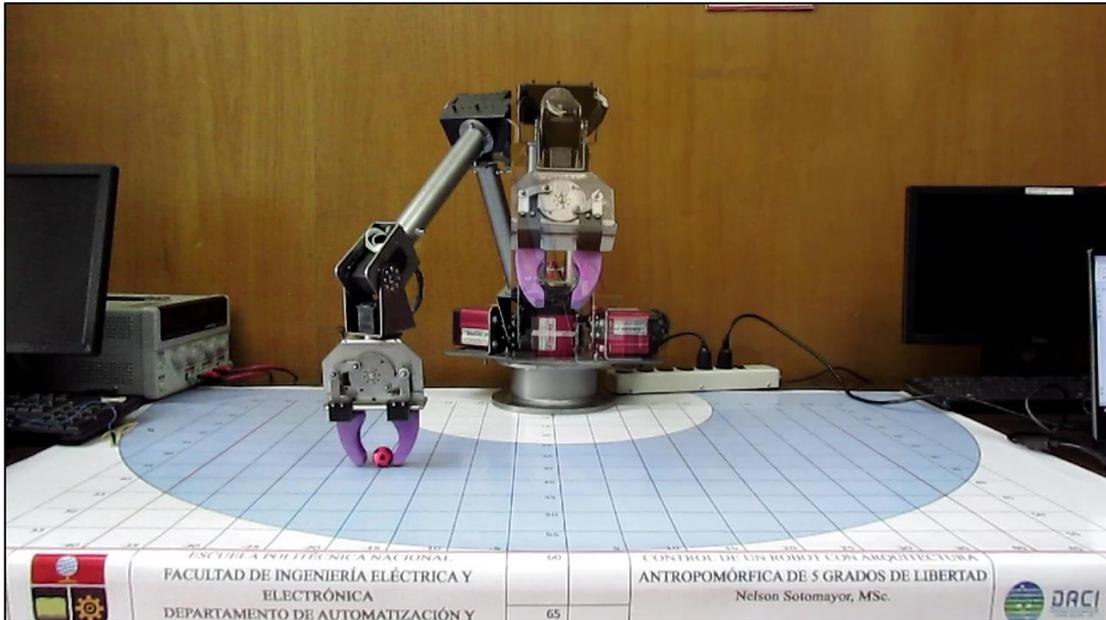


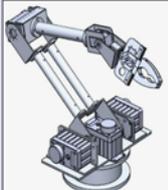
Figura 3.10. Efector final en la posición inicial deseada $X=35$, $Y=-20$ y $Z=1.5$

Se envía a los motores del brazo los ángulos calculados por la cinemática inversa para alcanzar la posición final deseada como se detalla en la Figura 3.11 y Figura 3.12.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
 Robot Antropomórfico de 5 grados de libertad
 CONTROL POR PALETIZACIÓN



POSICIÓN INICIAL		ÁNGULOS POSICIÓN INICIAL		ÁNGULOS ENVIADOS		ÁNGULOS REALIMENTADOS	
X	35		-30		74		74.0546
Y	-20		63		69		70.5066
Z	1.5		-101		-109		-109
			37		40		39.6000
			-30		74		71.2857
			142		170		164.0440
POSICIÓN FINAL		ÁNGULOS POSICIÓN FINAL					
X	10		74				
Y	35		69				
Z	1.5		-109				
			40				
			74				
			170				

Constant Value On

ENCENDER/APAGAR

Off

Figura 3.11. HMI enviando los ángulos para alcanzar la posición final $X=10$, $Y=35$ y $Z=1.5$.

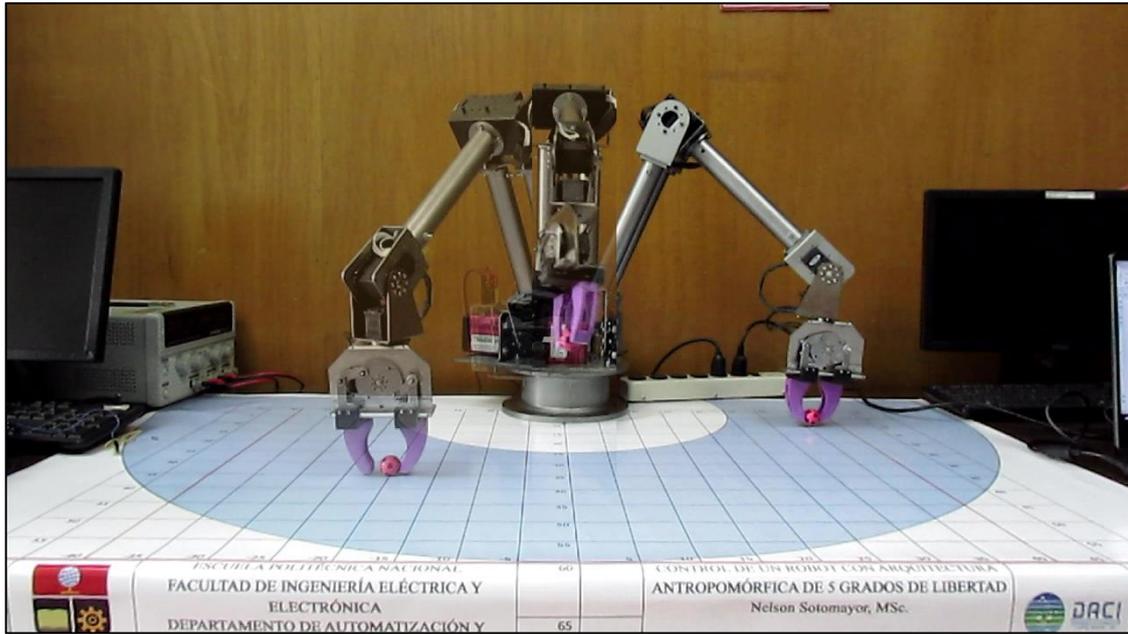


Figura 3.12. Efector final en la posición inicial final X=10, Y=35 y Z=1.5.

Finalmente, el brazo vuelve a su posición inicial y se debe apagar el interruptor del HMI.

Los datos de posición recopilados se pueden revisar en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados recopilados de posición

Posición inicial (HMI) [cm]	Posición inicial (REAL) [cm]	Posición final (HMI) [cm]	Posición final (REAL) [cm]
X: 40	X: 39.474	X: 25	X: 25.91
Y: 15	Y: 15.1820	Y: -30	Y: -30.748
Z: 1.5	Z: 2.6077	Z: 2	Z: 3.881
X: 35	X: 34.1157	X: 10	X: 9.9962
Y: -20	Y: -19.667	Y: 35	Y: 34.9866
Z: 1.5	Z: 1.9979	Z: 1.5	Z: 2.7025

Los datos de ángulos realimentados y enviados se pueden revisar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados recopilados de ángulos

Ángulos enviados al robot [°]	Ángulos iniciales recibidos del robot [°]	Ángulos iniciales enviados al robot [°]	Ángulos finales recibidos al robot [°]
GDL1: 21 GDL2: 60 GDL3: -95 GDL4: 35 GDL5: 21 Pinza: 142	GDL1: 21.0372 GDL2: 62.0528 GDL3: -96 GDL4: 34.38 GDL5: 19.9451 Pinza: 140.191	GDL1: -50 GDL2: 66 GDL3: -103 GDL4: 38 GDL5: -50 Pinza: 170	GDL1: -49.8803 GDL2: 67.6095 GDL3: -102 GDL4: 37.6200 GDL5: -48.3626 Pinza: 163.9560
GDL1: -30 GDL2: 63 GDL3: -101 GDL4: 37 GDL5: -30 Pinza: 142	GDL1: -2.9759 GDL2: 64.9024 GDL3: -102 GDL4: 36.63 GDL5: -29.1099 Pinza: 142.2418	GDL1: 74 GDL2: 69 GDL3: -109 GDL4: 40 GDL5: 74 Pinza: 170	GDL1: 74.0546 GDL2: 70.566 GDL3: -109 GDL4: 39.60 GDL5: 71.2857 Pinza: 164.044

3.1.2 Cálculo y análisis de los errores

El error absoluto de la posición real respecto de la deseada se revisa en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Cálculo de errores posiciones alcanzadas

No de prueba	Posición	Coordenada	Valor teórico [cm]	Valor real [cm]	Error absoluto [cm]	Error relativo [%]
1	INICIAL	X	40	39,5	0,5	1,25
		Y	15	15,2	0,2	1,33
		Z	1,5	1,6	0,1	6,67
	FINAL	X	25	25,9	0,9	3,60
		Y	-30	-30,7	0,7	2,33
		Z	2	1,9	0,1	5,00
2	INICIAL	X	35	34,1	0,9	2,57
		Y	-20	-19,7	0,3	1,50
		Z	1,5	1,8	0,3	20,00
	FINAL	X	10	9,9	0,1	1,00
		Y	35	34,9	0,1	0,29
		Z	2	1,7	0,3	15,00

La diferencia entre los valores teóricos y reales en la coordenada X es relativamente pequeña en ambas pruebas y posiciones, con un error relativo máximo de 3.6% que se obtiene de la posición final en X para la prueba 1 de la Tabla 3.3. Esto indica que el sistema es bastante preciso en esta coordenada. La coordenada Z muestra mayores errores relativos, especialmente en la prueba 2 de la Tabla 3.3, en la posición inicial y final con errores relativos de 20% y 15% respectivamente. La coordenada Y también presenta errores relativamente pequeños, con un error máximo de 3.6%. Esto muestra una buena

estabilidad y precisión en esta coordenada. En general, los errores absolutos son pequeños, lo que indica que el sistema es consistente y fiable. Sin embargo, se tienen mayor variabilidad en la coordenada Z, lo cual se debe a las características mecánicas del brazo.

A su vez, el error absoluto de los ángulos realimentados respecto al ángulo deseado que se envía a los motores se detalla en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Cálculo de errores ángulo realimentado

No. de prueba	Posición	Grado de libertad	Valor deseado [°]	Valor real [°]	Error absoluto [°]	Error relativo [%]
1	Inicial	1	21	21,0372	0,04	0,18
		2	60	62,0528	2,05	3,42
		3	-95	-96	1,00	1,05
		4	35	34,38	0,62	1,77
		5	21	19,9451	1,05	5,02
		Pinza	142	140,191	1,81	1,27
	Final	1	-50	-49,8803	0,12	0,24
		2	66	67,6095	1,61	2,44
		3	-103	-102	1,00	0,97
		4	38	37,62	0,38	1,00
		5	-50	-48,3626	1,64	3,27
		Pinza	170	163,956	6,04	3,56
2	Inicial	1	-30	-29,759	0,24	0,80
		2	63	64,9024	1,90	3,02
		3	-101	-102	1,00	0,99
		4	37	36,63	0,37	1,00
		5	-30	-29,1099	0,89	2,97
		Pinza	142	142,2418	0,24	0,17
	Final	1	74	74,0546	0,05	0,07
		2	69	70,566	1,57	2,27
		3	-109	-109	0,00	0,00
		4	40	39,6	0,40	1,00
		5	74	71,2857	2,71	3,67
		Pinza	170	164,044	5,96	3,50

Considerando el análisis de errores, el sistema demuestra una precisión aceptable, con errores absolutos pequeños en la mayoría de los grados de libertad y en la pinza. Los errores en las coordenadas X e Y son mínimos, lo que indica una buena precisión en estos ejes. En la coordenada Z, aunque se observa una mayor cantidad de error, esto se debe a que los valores reales están más cercanos al cero, lo que amplifica las diferencias. Sin embargo, estos errores no afectan significativamente la funcionalidad general del sistema.

La variabilidad en los ángulos del efector final se atribuye a características mecánicas específicas, pero en conjunto, los errores son relativamente pequeños y aceptables para las tareas de paletización. alcanzada. Adicionalmente en el manual de usuario se encuentran pruebas adicionales y el cálculo del error de los ángulos de cada grado de libertad.

3.1.3 Cálculo y análisis de repetibilidad.

Para la repetibilidad de los ángulos de las articulaciones se consideró el ángulo enviado a los motores y el ángulo que se recibe de estos como realimentación en un mismo punto por 3 ocasiones distintas. El análisis de repetibilidad se detalla en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Repetibilidad de los ángulos de cada articulación.

	Valor teórico [°]	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Desviación
GDL1	34	34,2028	34,1331	34,2724	0,11624398
GDL2	70	71,409	71,5515	71,5515	0,75499437
GDL3	-109	-108	-108	-109	0,57735027
GDL4	40	40,23	39,69	40,23	0,25578311
GDL5	34	32,5165	32,5165	35,5165	1,43472752
PINZA	142	140,8352	142,1538	141,011	0,67293746

El análisis de repetibilidad para los ángulos de las articulaciones muestran una desviación de hasta 1.4° en el quinto grado de libertad y la desviación más pequeña se encuentra en el primer grado de libertad con 0.11°.

De manera similar la repetibilidad de las posiciones X, Y y Z del efector final se obtuvo considerando como valor teórico las posiciones deseada contrastadas con mediciones de distancia en el espacio de trabajo del robot en un mismo punto en tres ocasiones distintas. El análisis de repetibilidad de la posición del efector final se indica en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Repetibilidad de la posición del efector final.

	Valor teórico (cm)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Desviación
X	30	30,1	30,3	30,3	0,15
Y	20	20,3	19,9	20	0,17320508
Z	1	0,9	1,1	0,95	0,08539126

Las desviaciones obtenidas mediante el análisis de repetibilidad de la posición del efector final indican un máximo de 0,17 cm que corresponde al eje de coordenadas Y.

Contrastando con el robot comercial ABB IRB 6700, el cual tiene una repetibilidad en sus ejes de 0.05 cm a una carga exigente [2], se puede decir que el robot PIMI 14-04 tiene una repetibilidad aceptable considerando que el control que se realiza es en lazo abierto.

3.2 LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTO

El robot desarrollado en el TIC “Ensamblaje y Control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad” tuvo el costo total que se detalla en la Tabla 3.7 [1].

Tabla 3.7. Cálculo de errores posiciones calculadas

Costo	Precio Unitario (USD)
Estructura del robot	956.00
Motores y módulo	6270.72
Tarjeta de control	45.25
Costo de ingeniería	3360.00
Total (USD)	10631.97

En este trabajo de integración curricular se manufacturo una pinza de 2 dedos diseñada en el PIMI-14-04 cuyos materiales se exponen en la Tabla 3.8:

Tabla 3.8. Materiales pinza de 2 dedos

Cantidad	Elemento	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
1	Piezas elaboradas en PLA	35	35
1	Piezas elaboradas en acero inoxidable	50	50
4	Rodamiento de bolas MR63 ZZ	6	24
1	Tuercas y tornillos	5	5
1	Motor Dynamixel MX-28R	489.06	489.06
Subtotal			603.06

Como se detalla en el manual de usuario del Anexo I, el Robot PIMI 14-04 también cuenta con una pinza de tres dedos desarrollada en el segundo componente del proyecto de Trabajo de integración curricular, el costo de manufactura se expone en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Materiales pinza de 3 dedos

Cantidad	Elemento	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
1	Piezas elaboradas en PLA	35	35
1	Piezas elaboradas en acero inoxidable	50	50
21	Rodamiento de bolas MR63 ZZ	6	126
1	Tuercas y tornillos	5	5
1	Motor Dynamixel MX-28R	489.06	489.06
Subtotal			705.06

Tomando en cuenta que la parte práctica del trabajo de integración curricular fue realizada tanto en las horas de trabajo con el tutor como en las horas de trabajo autónomo por dos estudiantes se calcula un trabajo ingeniería de 180 horas por cada uno siendo el costo por hora de 7 USD el costo de la mano de obra es de 2520 USD. Por tanto, el costo total del robot con sus dos modos de funcionamiento se muestra en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Costo total

Costo	Precio Unitario (USD)
Prototipo existente	10631.97
Materiales pinza de 3 dedos	705.06
Materiales pinza de 2 dedos	603.06
Costo de ingeniería	2520.00
Total (USD)	14460.09

3.3 CONCLUSIONES

- El realizar la revisión bibliográfica sobre el TIC "Ensamblaje y Control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad", permitió comprender en profundidad cómo se ejecutan las acciones de control tanto en bajo como en alto nivel, sentando una base teórica sólida para el desarrollo del trabajo de integración curricular.
- La revisión bibliográfica del proyecto de investigación PIMI-14-04 permitió obtener los planos necesarios para la manufactura de las piezas del efector final tipo pinza de dos dedos, esto facilitó el siguiente paso que es la manufactura y ensamblaje del componente.
- Se manufacturó y ensambló el efector final tipo pinza de dos dedos de acuerdo con el diseño proporcionado por el proyecto PIMI-14-04, pero se realizaron ligeros cambios

en los planos originales para optimizar el proceso de manufactura, lo que permitió una mejor integración y funcionamiento del componente del robot.

- Se adaptó el software de la memoria compartida y el control en bajo nivel desarrollado originalmente en el proyecto TIC "Ensamblaje y Control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de cinco grados de libertad", esta adaptación permitió al robot ejecutar tareas de paletización, demostrando la flexibilidad del software para nuevas aplicaciones.
- Se desarrolló el control en alto nivel y una interfaz gráfica en MATLAB-Simulink que facilita el control del robot. Esta interfaz permite una interacción intuitiva con el robot PIMI 14-04, mejorando significativamente la experiencia del usuario al realizar tareas de paletización.
- Las pruebas realizadas con el robot PIMI 14-04, siguiendo una hoja guía realizada para prácticas de laboratorio de robótica, mostraron resultados positivos. El robot demostró ser capaz de realizar tareas de paletización con errores muy bajos, validando así el éxito del proyecto en términos de control del sistema robótico.

3.4 RECOMENDACIONES

- Para futuros proyectos, se recomienda implementar un sistema de control en lazo cerrado. Esta mejora implicaría añadir un sistema de censado que permita monitorear en tiempo real la posición del efector final en el espacio de trabajo. Al incorporar sensores como cámaras de visión, sistemas de captura de movimiento o Unidades de Medición Inercial (MPU), el robot podría ajustar dinámicamente sus movimientos para corregir cualquier desviación y asegurar una mayor precisión en la ejecución de las tareas. Este enfoque no solo aumentará la exactitud del robot en actividades como la paletización, sino que también mejorará la robustez y fiabilidad del sistema en diversas aplicaciones.
- Para futuros proyectos, se recomienda determinar e integrar el modelo dinámico del robot. En este trabajo de integración curricular se utilizó únicamente el modelo cinemático inverso, lo cual es adecuado para ciertas aplicaciones, pero limita el control preciso bajo condiciones variables. Incorporar el modelo dinámico permitirá una mejor comprensión y control del comportamiento del robot considerando las fuerzas y momentos presentes durante el movimiento. Esto mejorará la precisión y eficiencia de sus acciones, especialmente en tareas que involucren cargas variables o movimientos rápidos.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Curicho, M. Páez López, "Ensamblaje y Control de un Robot con Arquitectura Antropomórfica de 5 Grados de Libertad: Tomo I y Tomo II", Quito: EPN, 2022.
- [2] ROS Components, "DataSheet Dynamixel MX-28R", ROS Components, Valencia, España, 2017. Accedido el 25 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: https://www.roscomponents.com/en/index.php?controller=attachment&id_attachment=103
- [3] ABB, "Product especificaion IRB 6700", ABB, Zürich, Suiza, 2024. Accedido el 16 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/articulated-robots/irb-6700>
- [4] KUKA, "LBR iiwa (7 ejes) - datos técnicos", KUKA, Augsburg, Alemania, 2022. Accedido el 17 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial/lbr-iiwa>
- [5] N. Sotomayor, O. Zambrano *et al*, "PIMI-14-04 - Investigación de soluciones tecnológicas inteligentes para exploración y transporte de objetos en zonas nocivas para seres humanos", Quito: EPN, 2019.
- [6] E. Asencios y J. Chávez, "Resistencia de materiales: Factor de seguridad", Universidad Nacional de ingeniería, Lima, Perú, 2015.
- [7] Worldsteel Association, "Steel Facts", Worldsteel, Bruselas, Bélgica, 2024. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://worldsteel.org/about-steel/>
- [8] Universidad Miguel Hernández de Elche, "Prácticas de robótica usando MATLAB Práctica 2: Cinemática de Robots", UMH, Alicante, España, 2012.
- [9] Carrera en Electrónica y Automatización, "Hoja guía Práctica 3: MODELADO DEL ROBOT IRB 140 DE ABB", EPN, Quito, Ecuador, 2024. Accedido el 1 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: https://cea.epn.edu.ec/images/HOJAS_GUIAS_24A/ROBOTICA/P3_Robotica.pdf

5 ANEXOS

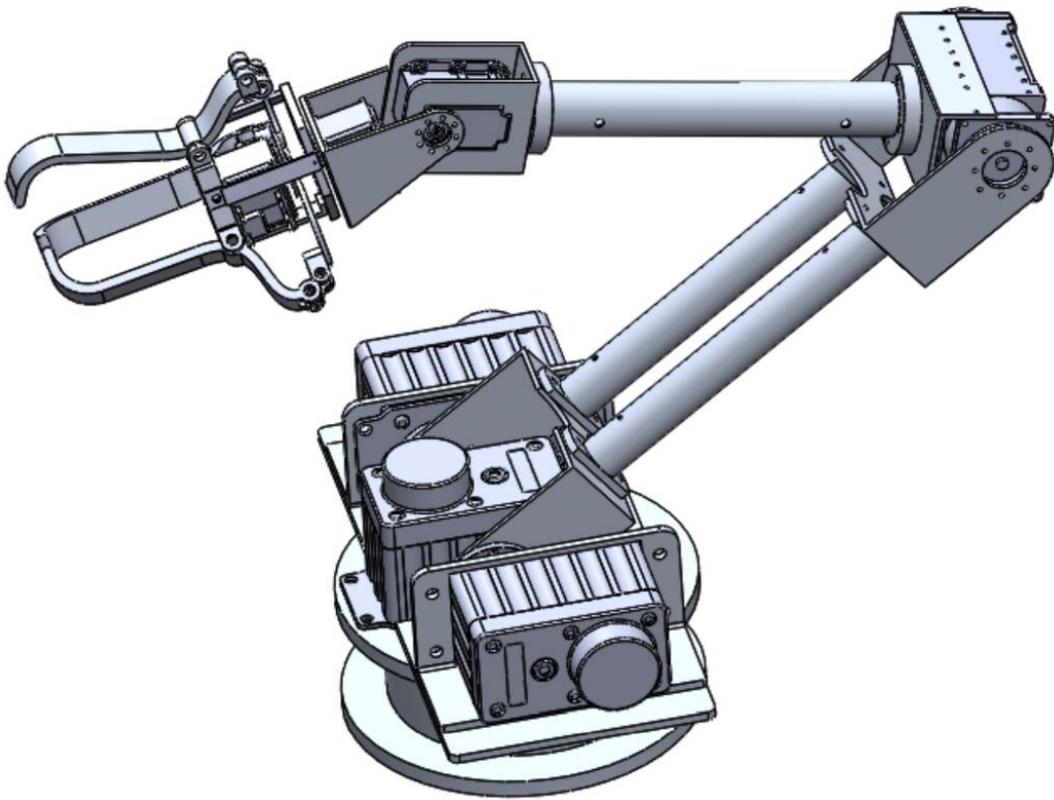
ANEXO I. Manual de usuario

ANEXO II. Planos del efector final tipo pinza de 2 dedos

ANEXO III. Hojas guías (Hoja guía “Paletización”, Hoja guía “Cinemática Inversa”).

ANEXO I

*MANUAL DE USUARIO DEL ROBOT CON
ARQUITECTURA ANTROPOMÓRFICA DE 5
GDL ROBOT PIMI-14-04*



Elaborado por:

Ma. Gabriela Cantuña

Erick Chávez

Revisado por: Nelson Sotomayor, MSc

I.1. INTRODUCCIÓN

El Robot con Arquitectura Antropomórfica de 5 GDL PIMI-14-04 al cual pertenece el presente manual de usuario está diseñado para ser controlado de forma manual y para realizar tareas de paletización. Se asocia el control manual con la cinemática directa del robot y la paletización con la cinemática inversa, es decir, se ingresa la posición inicial y final en coordenadas de X, Y y Z y la cinemática calcula los ángulos que sirven para comandar los motores que conforman el robot.

I.2. OBJETIVO

El propósito de este manual de usuario es guiar al operador del PIMI-14-04 antes y durante su puesta en marcha. Se busca explicar las características del robot, de sus efectores finales y el funcionamiento de los programas que permiten comandarlo. A su vez, se busca evitar cualquier daño para el operador como para el equipo, de tal forma que el usuario pueda aprovechar al máximo las ventajas que posee el Robot con Arquitectura Antropomórfica de 5 grados de libertad.

I.3. CARACTERÍSTICA TÉCNICAS DEL ROBOT

El Robot PIMI 14-04 es un brazo robótico de 5 GDL elaborado en acero de transmisión el cual esta comandado con 7 servomotores: tres motores Torxis i00600 colocados en la base, un motor Dynamixel PRO ubicado en el codo, un motor Dynamixel MX-64 en la muñeca y dos motores Dynamixel MX-28 uno el giro de la pinza y el otro para su apertura como se ve en la Figura I.1. Su peso aproximado es de 20 Kg y la altura máxima que alcanza en posición vertical es de 83.5 cm.

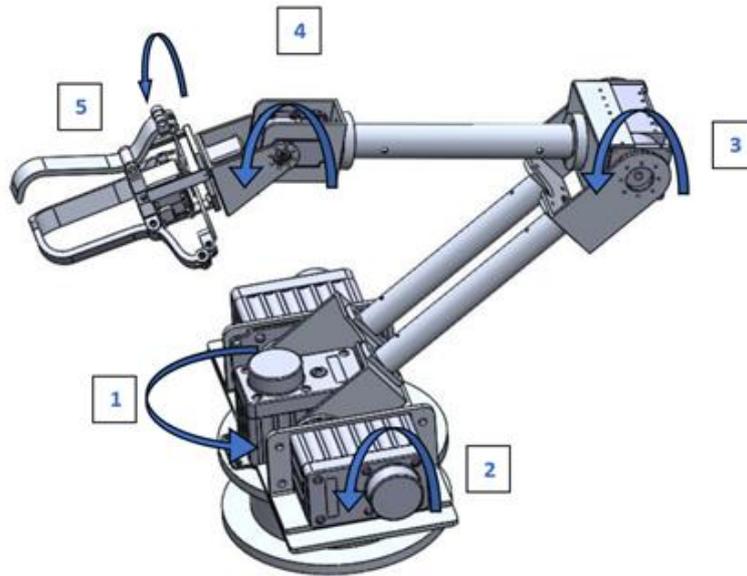


Figura I.1. Asignación del número de articulaciones y eje de rotación.

Como se ve en la Figura I.1. el robot antropomórfico de 5GDL está conformado por siete servomotores que se encargan del movimiento de las articulaciones y de la pinza, su distribución se describe en la Tabla I.1.

Tabla I.1. Servomotores .

N° de articulación	N° de motores	Modelo del motor	Ubicación	Rango de rotación	Voltaje de alimentación	Corriente
1	1	Torxis	Hombro	-90 a 90°	24 VDC	3 A
2	2	Torxis	Hombro	0 a 90°	24 VDC	3 A
3	1	Dynamixel PRO	Codo	0 a -150°	24 VDC	1.9 A
4	1	Dynamixel MX-64R	Muñeca	0 a 180°	12 VDC	1.5 A
5	1	Dynamixel MX-28R	Muñeca	-90 a 90	12 VDC	1.4 A
Pinza	1	Dynamixel MX-28R	Pinza	Depende del tipo de pinza	12 VDC	1.4 A

El efector final se comanda con un motor Dynamixel MX-28 para el cierre y apertura de la pinza, este efector final es intercambiable a una pinza de 2 dedos y una de 3 dedos.

El robot PIMI 14-04 está programado para que realice tareas de paletización y control manual.

I.4. REQUERIMIENTOS

- **Software**
 - Simulink con las librerías:
 - Librería Simulink Desktop Real-Time
 - Librería SAS TOOLS Public (Proporcionada en el CD)
 - Visual Studio 2012
 - Arduino IDE con las librerías Torxis y DynamixelSerial2 con soporte PRO (Librerías se encuentran en el CD)
- **Hardware**
 - Fuente de alimentación 12 V y 3 A
 - Fuente de alimentación 24 V y 2 A
 - Cable USB para Arduino mega
 - Cables de conexión banana-banana

I.5. FUNCIONAMIENTO

I.5.1. CONEXIÓN

Los motores del robot PIMI-14-04 requieren de dos tipos de alimentación: 12 V y 24 V. Es importante comprobar que la fuente este entregando esos voltajes antes de realizar cualquier conexión.



Figura I.2. Borneras de alimentación

Como se observa en la Figura I.2. robot PIMI-14-04 cuenta con 4 borneras para conectar la alimentación de los motores. Las borneras con la letra A se conectarán al terminal positivo y las borneras con la letra B al terminal negativo de sus correspondientes alimentaciones.

Para comunicar el computador con tarjeta embebida Arduino Mega se utilizará un cable tipo USB B.

	<ul style="list-style-type: none">• Es importante que se alimente los motores antes de conectar el cable tipo USB B al computador.• El Arduino Mega debe estar conectado al COM 1 debido a requerimientos de la memoria compartida.
---	--

I.5.2. MEMORIA COMPARTIDA

Una vez alimentados los motores y luego conectado el Arduino Mega se debe abrir el programa de la memoria compartida en Visual Studio, su nombre es: Manipulador_Comunicacion.sln.

Para correr el programa de la memoria compartida se debe seleccionar *Depurador local de Windows* como se observa en la Figura I.3.

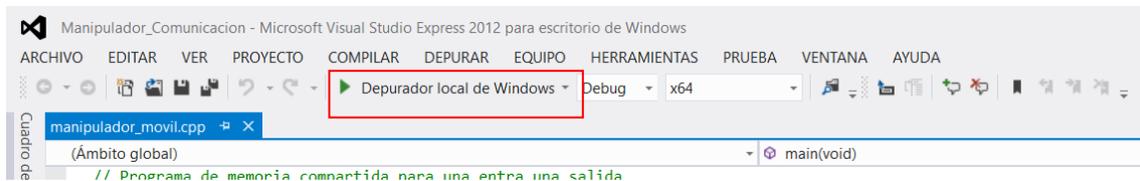


Figura I.3. Depuración de la memoria compartida

Se abrirá una ventana Comand Window como se ve en la Figura I.4. que solicitará ingresar el COM al cual se encuentra conectado el Arduino Mega el cual deberá ser COM 1.

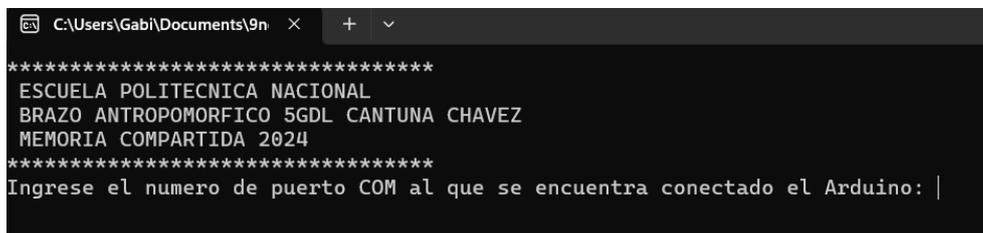


Figura I.4. Elección del COM para el Arduino.

	<ul style="list-style-type: none"> • Es importante que el programa en Simulink-Matlab se corra antes de presionar ENTER. No presione ENTER hasta que el manual de usuario se lo indique. • Se debe leer la sección correspondiente al tipo de pinza que se va a utilizar antes de poner en marcha cualquiera de los programas.
---	--

Después se solicitará correr el programa en Matlab-Simulink como se observa en la Figura I.5.

```

*****
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
BRAZO ANTROPOMORFICO 5GDL CANTUNA CHAVEZ
MEMORIA COMPARTIDA 2024
*****
Ingrese el numero de puerto COM al que se encuentra conectado el Arduino: 1
*****
Una vez que MATLAB-SIMULINK se encuentre en funcionamiento
Presione ENTER para continuar
|

```

Figura I.5. Ejecución de la memoria compartida en conjunto.

No presione ENTER todavía.

I.5.3. INTERFAZ DE USUARIO

Dependiendo de cual aplicación se quiere realizar se deberá correr alguno de los siguientes programas:

- Si se va a realizar control manual se debe correr el programa *CONTROL_MANUAL_CANTUNA.slx*
- Si se desea realizar paletización se debe correr el programa *PALETIZACION_CHAVEZ.slx*
- Si se desea ingresar directamente los ángulos de los motores del robot se debe correr el programa *CONTROL_MOTORES.slx*

Al utilizar cada uno de los HMIs se debe tener ciertas consideraciones que se describirán a continuación. Lea la sección correspondiente antes de correr alguno de los programas.

I.5.3.1. Control manual

El HMI del control manual que se observa en la Figura I.6. cuenta con las siguientes partes:

1. Interruptor de encendido/apagado: cuando se encuentra activo se puede realizar el control en modo manual, cuando se encuentra inactivo el robot regresa a su posición inicial y ya no se puede modificar el ángulo de los motores.
2. Botones de control del ángulo de los motores.
3. Bloque que contiene el diagrama de bloques de Simulink para el control en modo manual.
4. Display que indica los ángulos enviados a los motores.
5. Display que indica los ángulos realimentados de los motores.
6. Displays que muestran la posición del efector final calculada mediante la cinemática directa.



Figura I.6. Interfaz gráfica para el control manual del robot PIMI 14-04.

La posición de los motores se podrá controlar tanto por los botones en la interfaz de usuario como por un Joystick conectado a Simulink. El Joystick que se va a utilizar es el Genius MaxFighter F-31U cuya distribución de botones se observa en la Figura I.7.



Figura I.7. Genius MaxFighter F-31U

La palanca permite mover los motores del hombro del robot, si se mueve en el sentido Derecha-Izquierda la base del robot girará. Si se mueve la palanca al frente o atrás el hombro del robot se inclina o se eleva.

Los botones 3 y 4 permitirán elevar y agachar el codo del robot respectivamente.

El POV permite mover los motores de la muñeca, si se mueve en el sentido Derecha-Izquierda la muñeca del robot girará. Si se mueve al frente o atrás la muñeca del robot se inclina o se eleva.

Los botones 1 y 2 permiten cerrar y abrir la pinza respectivamente.

La posición XYZ se calcula mediante la cinemática directa del robot. Dicha cinemática se debe ingresar en un script nombrado Cinematica_Directa.m el cual debe seguir la estructura:

```
function f = Cinematica_Directa(th1g,th2g,th3g,th4g,th5g)
%Dimensiones eslabones
L1=12;
L2=35;
L3=31;
L4=6.5;
```

```

L5=15;
%Conversión grados a radianes
th1= deg2rad(th1g);
th2=deg2rad(th2g);
th3=deg2rad(th3g);
th4=deg2rad(th4g);
th5=th5g;
X=Ec1;
Y=Ec2;
Z=Ec3;
f=[X,Y,Z];
end

```

El control en modo manual tiene como propósito controlar cada uno de los motores del robot de forma independiente, para lo cual se trabaja a la par con los botones del HMI y un Joystick que se conecta con Simulink.

	<ul style="list-style-type: none"> • Es importante que el Joystick Genius MaxFighter F-31U se encuentre conectado al computador antes de correr el programa <i>CONTROL_MANUAL_CANTUNA.slx</i>. • Es necesario que el script <i>Cinematica_Directa.m</i> se encuentre en la misma carpeta que el programa <i>CONTROL_MANUAL_CANTUNA.slx</i>. • Antes de correr el programa <i>CONTROL_MANUAL_CANTUNA.slx</i> es importante comprobar que el interruptor se encuentre apagado. • El usuario debe mantenerse fuera del área de trabajo para evitar accidentes. • El usuario siempre debe visualizar el efector final del PIMI-14-04 cuando se corra el programa <i>CONTROL_MANUAL_CANTUNA.slx</i>.
---	--

Si ya se cumplen con los requisitos anteriores se puede dar ENTER en el COMAND WINDOW de la memoria compartida.

El robot se moverá a su posición inicial y si se quiere empezar a controlarlo se deberá encender el interruptor.

I.5.3.2. Paletización

La interfaz gráfica que se observa en la Figura I.8. posee un campo para agregar una posición inicial que corresponde al lugar donde se toma el objeto a paletizar y una posición final la cual es la ubicación donde el objeto va a ser dejado, esta secuencia se activa mediante un interruptor en el HMI. Los elementos que posee el panel frontal del HMI son:

Encender/Apagar: este es un interruptor que inicia la secuencia de paletización al encenderse y deja en condiciones iniciales al robot al apagarse.

Posición inicial: Consta de tres parámetros de ingreso los cuales cuentan con la posición en X, Y y Z para el inicio de la paletización.

Posición Final: Consta de tres parámetros de ingreso los cuales cuentan con la posición en X, Y y Z para el punto final de la paletización.

Ángulos posición inicial: Son los ángulos para cada grado de libertad y el efector final que se obtiene de la cinemática inversa correspondientes al punto inicial.

Ángulos posición final: Son los ángulos para cada grado de libertad y el efector final que se obtiene de la cinemática inversa correspondientes al punto final.

Ángulos enviados: Son los ángulos para cada grado de libertad y el efector final que se están enviando en ese momento al robot.

Ángulos realimentados: Son los ángulos correspondientes a la realimentación para cada uno de los grados de libertad y el efector final.

Subsistema Brazo: Es la máscara del subsistema en simulink donde se encuentra toda la lógica de control, cinemática inversa y secuencia de operación para realizar tareas de paletización.



Figura I.8. Interfaz gráfica para paletización con el robot PIMI 14-04

El programa depende de la cinemática inversa del robot la cual calcula los ángulos en que se deben ubicar los motores para alcanzar una posición deseada. Para el cálculo de las ecuaciones de los ángulos se debe:

- Determinar el modelo cinemático inverso de los primeros 3 grados de libertad ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) del robot con arquitectura antropomórfica de 5 GLD mediante Denavit-Hartenberg.
- Determinar el modelo cinemático inverso de los grados de libertad 4 y 5 (θ_4 y θ_5).

Nota1: Para obtener los primeros tres ángulos será necesario conocer X_0^3, Y_0^3 y Z_0^3 . Como se desea que el efector final este siempre perpendicular al plano XY y paralelo al eje de coordenadas Y se cumplirá que:

$$X_0^3 = X$$

$$Y_0^3 = Y$$

$$Z_0^3 = Z + d_4 + d_5$$

Nota 2: Para los ángulos de los grados de libertad de θ_4 y θ_5 se realiza un análisis geométrico ya que debido a la naturaleza de la aplicación se desea que el efector final este siempre perpendicular al plano XY y paralelo al eje de coordenadas Y. Para este fin se debe realizar un análisis en el plano XZ para obtener el ángulo θ_4 y también analizar en el plano XY para obtener el ángulo θ_5 . Las Figuras I.9 y I.10 permiten observar perspectivas que facilitarán el cálculo de θ_4 y θ_5 .

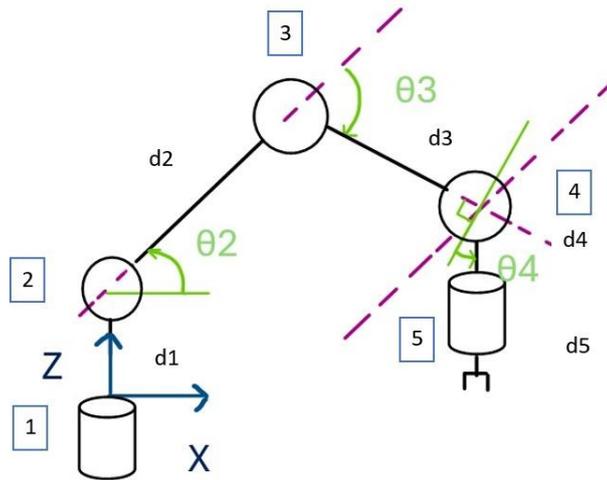
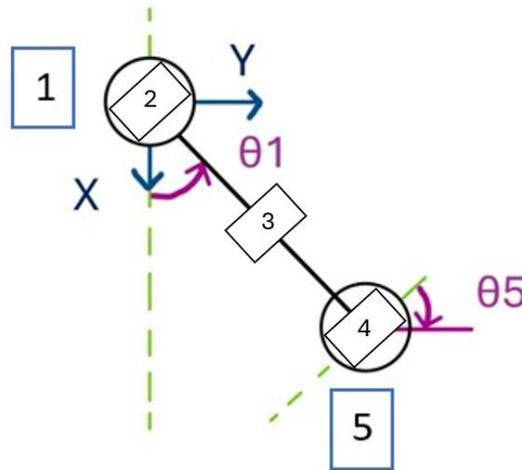


Figura I.9. Esquema del robot antropomórfico de 5 GDL (perspectiva XZ).



Figuras I.10. Esquema del robot antropomórfico de 5 GDL (perspectiva XY).

En este HMI que la cinemática inversa este bien calculada es fundamental. Se requiere ingresar la cinemática inversa en un script con el nombre CinematicalInversa.m. el cual debe seguir la estructura:

```
function p = CinematicalInversa(X1,Y1,Z1)
%Dimensiones eslabones
L1=12;
L2=35;
L3=31;
L4=7;
L5=16;
X=X1;
Y=Y1;
Z=Z1+L4+L5;
th1=Ec1;
th3=Ec2;
th2=Ec3;
th4=Ec4;
th5=Ec5;
```

```
th1s=round(rad2deg(th1));
th2s=round(rad2deg(th2));
th3s=round(rad2deg(th3));
th4s=round(rad2deg(th4));
th5s=round(rad2deg(th5));
p=[th1s,th2s,th3s,th4s,th5s];
end
```



- El usuario debe mantenerse fuera del área de trabajo para evitar accidentes.
- Es necesario que el script CinematicaInversa.m se encuentre en la misma carpeta que el programa de Simulink.
- El usuario siempre debe visualizar el efector final del PIMI-14-04 cuando se corra el programa.
- Antes de correr el programa es importante comprobar que el interruptor se encuentre apagado.

Si ya se cumplen con los requisitos anteriores se puede dar ENTER en el COMAND WINDOW de la memoria compartida. El robot se moverá a su posición inicial y se podrá modificar la posición inicial y final de la paletización. Se debe ingresar coordenadas que se encuentren dentro del rango de trabajo que se indica en la sección I.6. Si se quiere empezar el proceso de paletización se deberá encender el interruptor.

I.5.3.3. Control directo de motores

Se ha provisto de un HMI adicional que permite modificar el ángulo que se desea enviar a los motores del robot de forma directa el cual se puede encontrar en el archivo CONTROL_MOTORES.slx y se observa en la Figura I.11. Es importante comprobar que ángulos se está enviando al robot antes de correr este programa.

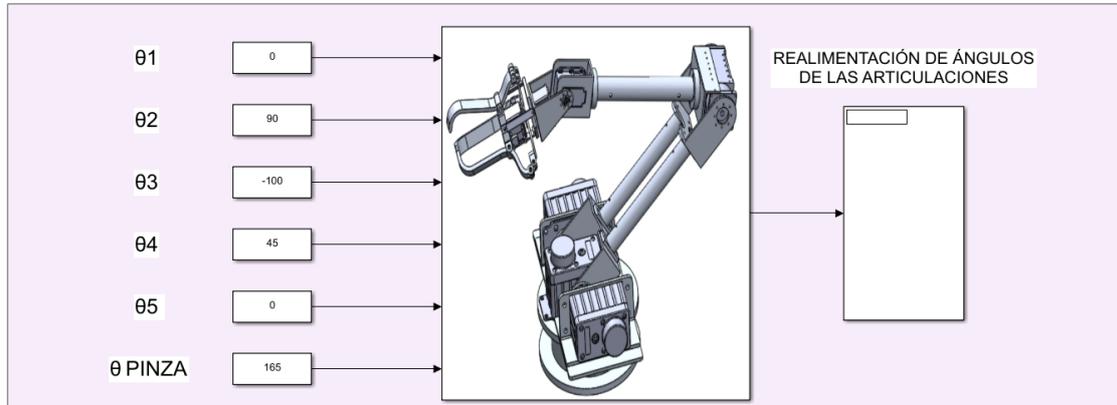


Figura I.11. Interfaz control directo de los motores

I.6. PINZAS

El robot es compatible con dos pinzas, una de dos dedos y la otra de tres dedos. La apertura de cada pinza depende de un servomotor Dynamixel MX-28R. Debido a la mecánica de cada pinza los valores que se deben enviar para su apertura y cierre total son distintos como se muestra en la Tabla I.2.

Tabla I.2. Límites pinzas

Tipo de pinza	Ángulo para la apertura total	Ángulo para el cierre total
2 dedos	160	130
3 dedos	145	190

Las pinza de dos dedos fue diseñada para trabajar con el programa de Paletización y la pinza de 3 dedos con el programa de control manual. Pese a eso se puede trabajar con ambas pinzas en ambos programas, pero se debe tomar en cuenta algunas consideraciones.

- En ambos programas se ha saturado los ángulos que se envían a la memoria compartida. Es importante que dependiendo de con que pinza se este trabajando se sature el ángulo del motor de la pinza con los valores de la Tabla I.2.
- Cuando se trabaja con el programa *PALETIZACION_CHAVEZ.slx* se considera un ángulo determinado para que la pinza se cierre dependiendo del ancho de un objeto preseleccionado que en este caso es una pelota de 2 cm de diámetro. Si se desea sostener un objeto de un tamaño distinto se debe seguir el siguiente proceso:

1. Abrir el programa CONTROL_MOTORES.slx y en el valor del motor de la pinza ingresar 160.
2. Correr el programa CONTROL_MOTORES.slx
3. Abrir completamente la pinza.
Pinza de 2 dedos: se envía el ángulo 180°.
Pinza de 3 dedos: se envía el ángulo 145.
4. Colocar en el centro de la garra el objeto que se desea sostener.
5. Cerrar paulatinamente la pinza hasta sostener el objeto.
Pinza de 2 dedos: se reduce el ángulo en pasos de 5°.
Pinza de 3 dedos: se aumenta el ángulo en pasos de 5°.
6. Ingresar 160 en el ángulo de la pinza y detener el programa.
7. Abrir el programa PALETIZACION_CHAVEZ.slx e ingresar al subsistema que contiene el diagrama de bloques del programa como se observa en la Figura I.12.



Fig. I.12. Ingreso al subsistema del HMI de paletización.

8. Ingresar al bloque Matlab Function y en la línea 10 del código modificar el ángulo de cerrado de la pinza determinado en el paso 5 como se observa en la Figura I.13.

```

1 function [p,pf, gdl,pinza,XYZ] = fcn(X,Y,Z,Xf,Yf,Zf,M_XYZ, M_GDL,M_PINZA, INICIO)
2 p=[0,0,0,0,0,0];
3 pf=[0,0,0,0,0,0];
4 thi=[0 0 0 0];
5 thf=[0 0 0 0];
6 th=[0 90 -100 45 0];
7 gdl=[0 90 -100 45 0];
8 pinza=170;
9 pinza_abierta=170;
10 pinza_cerrada=142;%revisar

```

Fig. I.13. Ingreso al bloque Matlab Function del HMI de paletización.

- Cuando se cambia de pinza es importante que antes de conectar la nueva pinza el motor de giro de la muñeca este en 0°. La pinza de dos dedos se debe colocar en paralelo con el plano Y como se ve en la Figura I.14.:

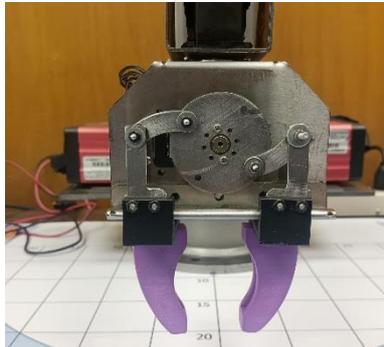


Fig. I.14 Posición inicial de la pinza de dos dedos.

- La pinza de tres dedos se debe colocar como se ve en la Figura I.15.

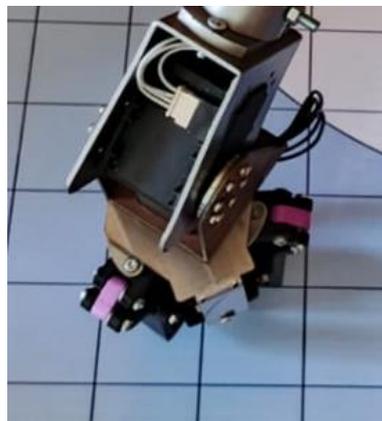


Fig. I.15. Posición inicial de la pinza de tres dedos.

I.7. ERROR PROMEDIO

Se ha calculado el error promedio de la realimentación de los 7 motores realizando diez pruebas:

Tabla I.3. Errores GDL 1

GDL1			
Nº de prueba	Valor teórico [°]	Valor real [°]	Error relativo [%]
1	-33,00	-33,17	0,01
2	-4,00	-3,85	0,04
3	73,00	72,86	0,00
4	21,00	21,04	0,00
5	-50,00	-49,88	0,00
6	-30,00	-29,76	0,01
7	74,00	74,05	0,00
8	7,00	7,11	0,02
9	-14,00	-14,01	0,00
10	-37,00	-36,94	0,00
Error promedio GDL 1			0,008

Tabla I.4. Errores GDL 2

GDL2			
N° de prueba	Valor teórico [°]	Valor real [°]	Error relativo [%]
1	71,00	72,26	0,02
2	70,00	71,41	0,02
3	78,00	79,01	0,01
4	60,00	62,05	0,03
5	66,00	67,61	0,02
6	63,00	64,90	0,03
7	69,00	70,57	0,02
8	85,00	85,75	0,01
9	64,00	65,47	0,02
10	63,00	64,90	0,03
Error promedio GDL 2			0,02

Tabla I.5. Errores GDL 3

GDL3			
N° de prueba	Valor teórico [°]	Valor real [°]	Error relativo [%]
1	-95,00	-96,00	0,01
2	-103,00	-102,00	0,01
3	-101,00	-102,00	0,01
4	-109,00	-109,00	0,00
5	-116,00	-115,00	0,01
6	-116,00	-115,00	0,01
7	-130,00	-130,00	0,00
8	-98,00	-97,00	0,01
9	-100,00	-101,00	0,01
10	-112,00	-111,00	0,01
Error promedio GDL 3			0,008

Tabla I.6. Errores GDL 4

GDL4			
N° de prueba	Valor teórico °	Valor real °	Error relativo %
1	53,00	52,47	0,01
2	41,00	40,68	0,01
3	51,00	50,94	0,00
4	35,00	34,38	0,02
5	37,00	36,63	0,01
6	40,00	39,60	0,01
7	35,00	34,56	0,01
8	36,00	36,00	0,00
9	45,00	44,73	0,01
10	38,00	37,62	0,01
Error promedio GDL 4			0,01

Tabla I.7. Errores GDL 5

GDL5			
N° de prueba	Valor teórico [°]	Valor real [°]	Error relativo [%]
1	-1,00	-0,89	0,11
2	-20,00	-19,53	0,02
3	21,00	19,95	0,05
4	-50,00	-48,36	0,03
5	-30,00	-29,11	0,03
6	74,00	71,29	0,04
7	34,00	32,52	0,04
8	-37,00	-35,79	0,03
9	-14,00	-13,55	0,03
10	-20,00	-19,64	0,02
Error promedio GDL 5			0,04

Tabla I.8. Errores PINZA

PINZA			
N° de prueba	Valor teórico [°]	Valor real [°]	Error relativo [%]
1	145,00	140,48	0,03
2	164,00	157,89	0,04
3	178,00	170,02	0,04
4	142,00	140,19	0,01
5	170,00	163,96	0,04
6	142,00	142,24	0,00
7	170,00	164,04	0,04
8	142,00	142,86	0,01
9	142,00	140,75	0,01
10	160,00	154,64	0,03
Error promedio PINZA			0,02

I.8. RANGO DE TRABAJO

El robot se ubica en el semicírculo de color rosado.

La zona azul es el área de trabajo en el plano XY.

En Z el robot puede trabajar en el rango de 1.5 cm a 20 cm

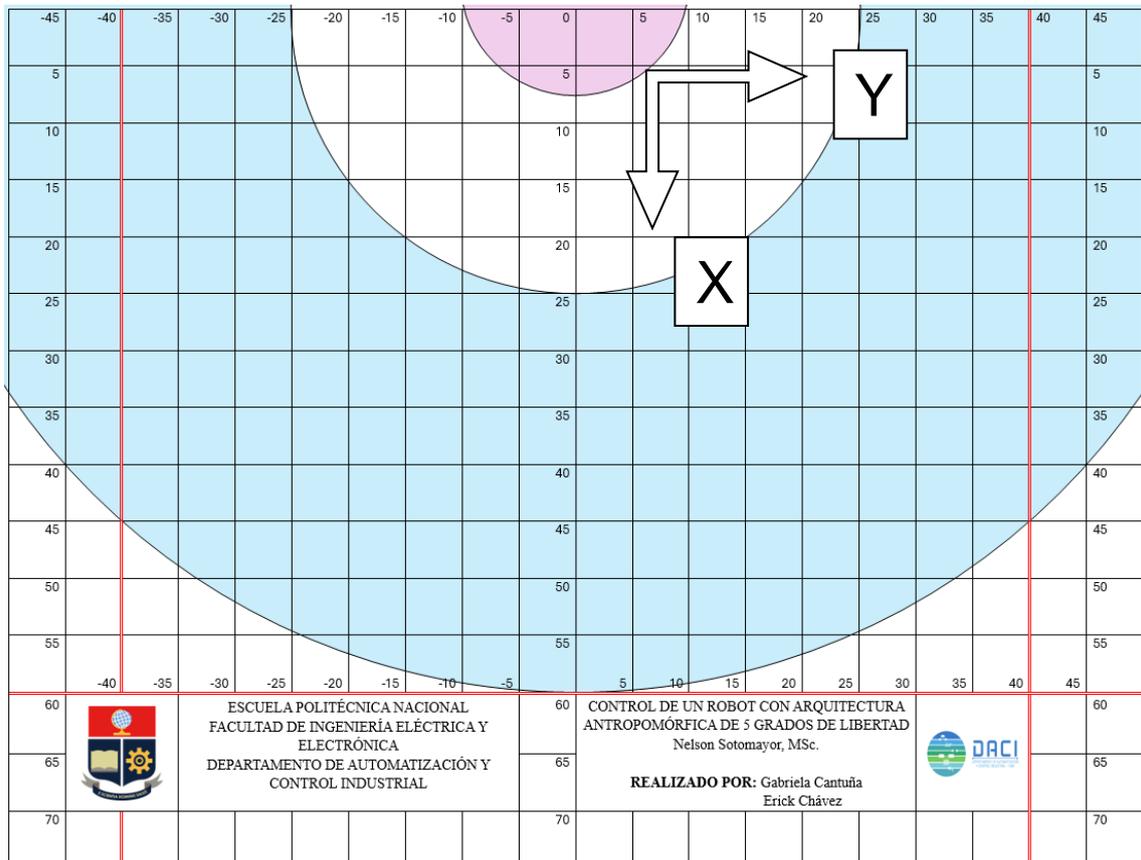
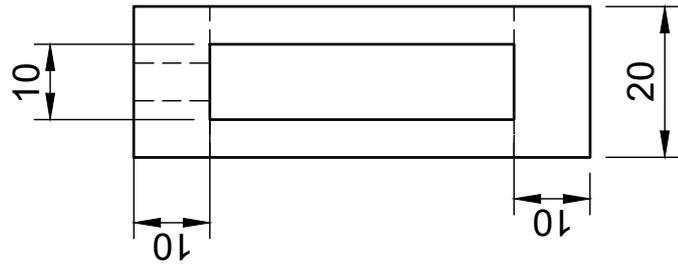
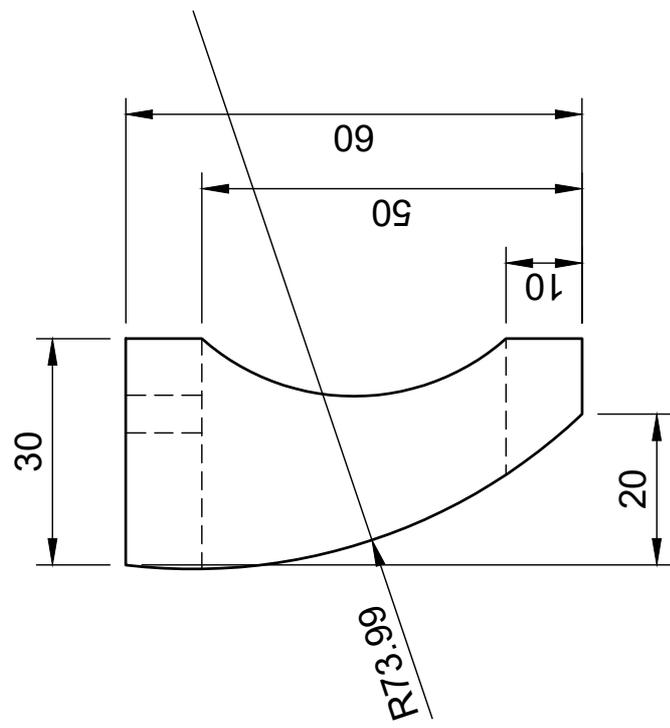


Fig. I.16. Área de trabajo definida.



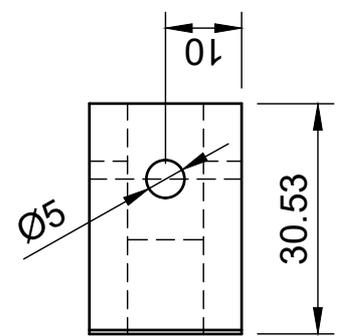
- Si tiene dudas sobre el manual de usuario o el uso de alguno de los programas puede contactarse con los autores mediante los siguientes correos: mariagabriela8.2001@gmail.com; erickch49@gmail.com

DEDO



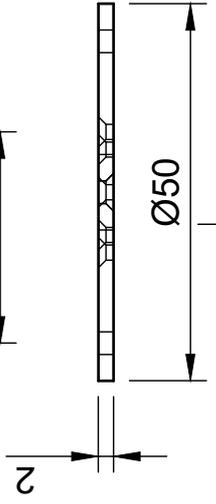
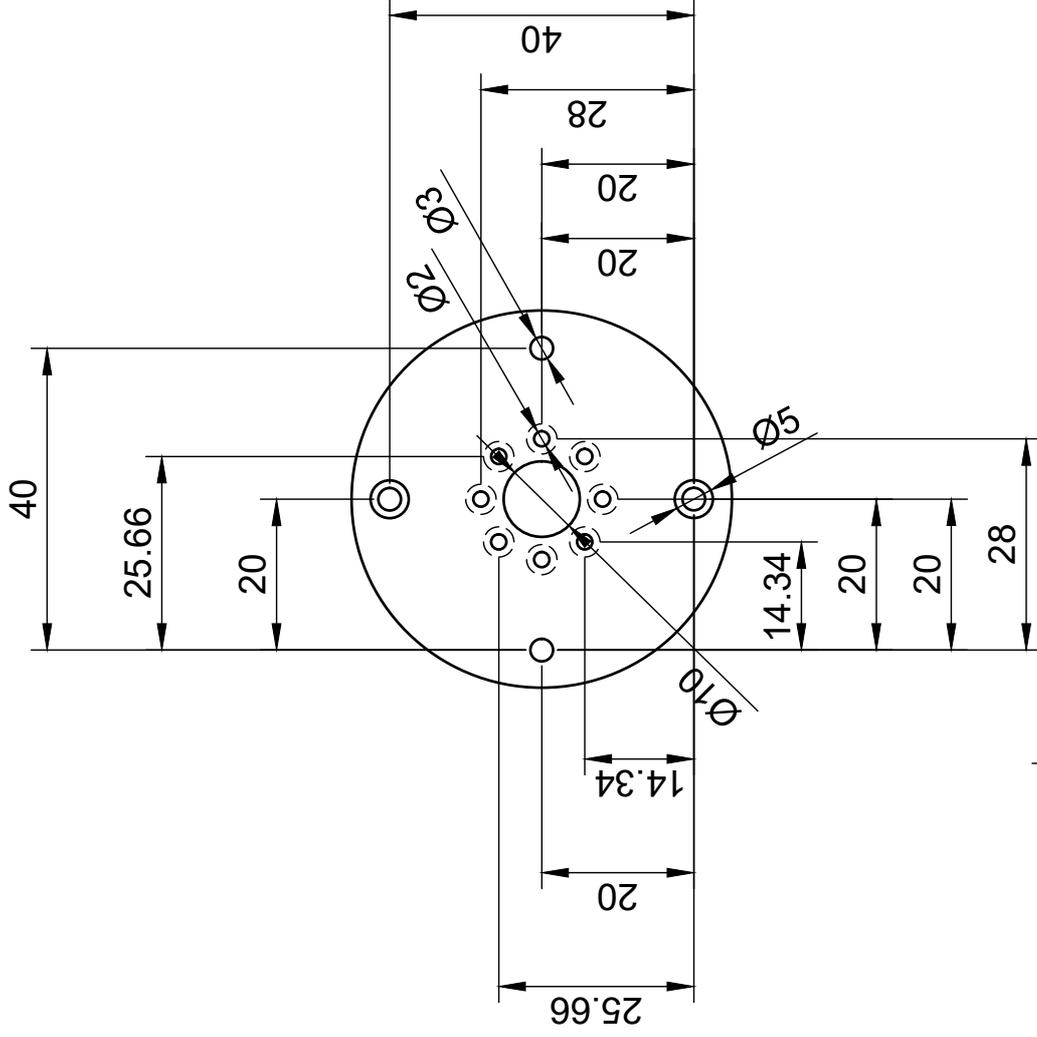
ANEXO II

70



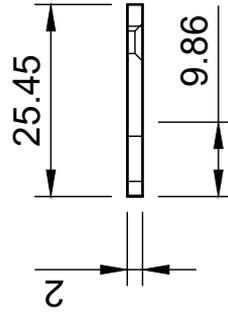
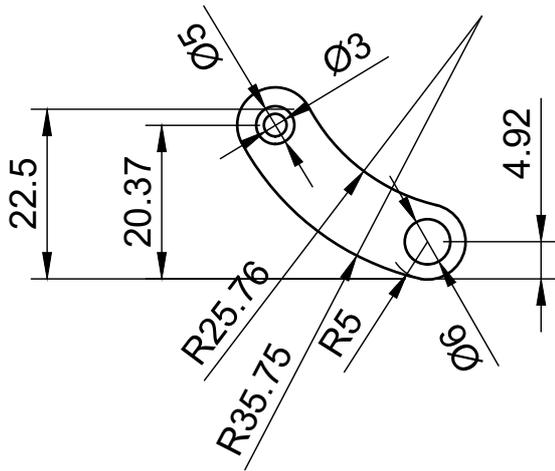
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PIMI-14-04
PLANO PINZA 2 DEDOS: DEDO

ADAPTADOR

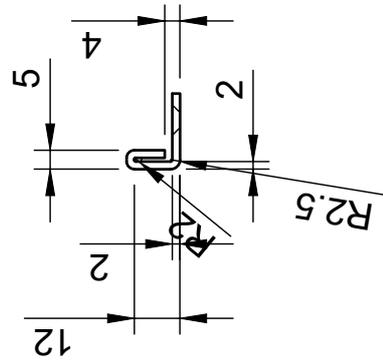
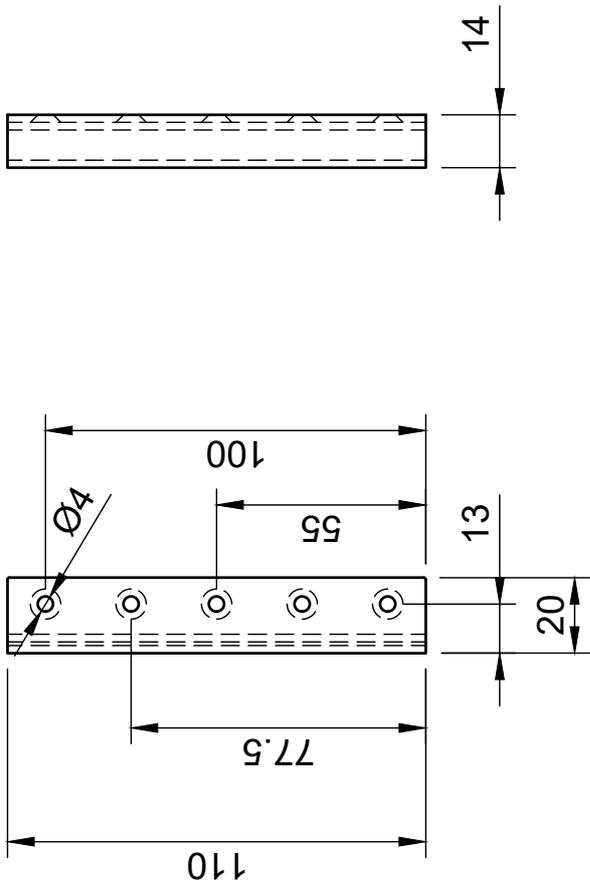


ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PIMI-14-04
PLANO PINZA 2 DEDOS: ADAPTADOR

LEVA

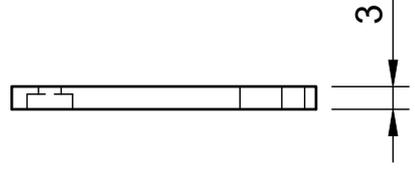
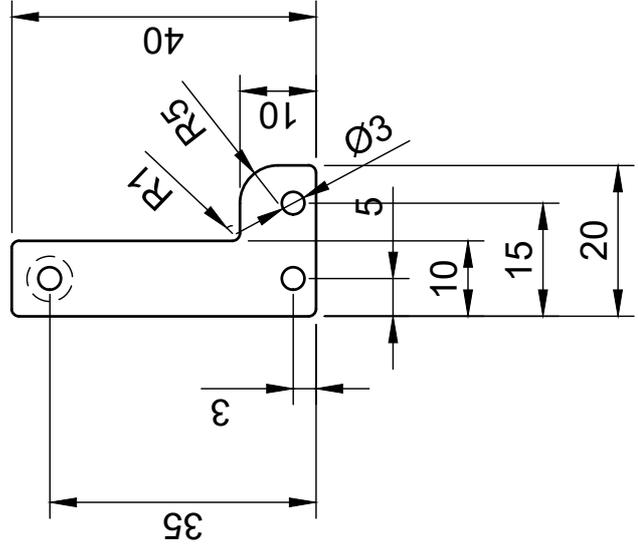


GUIA



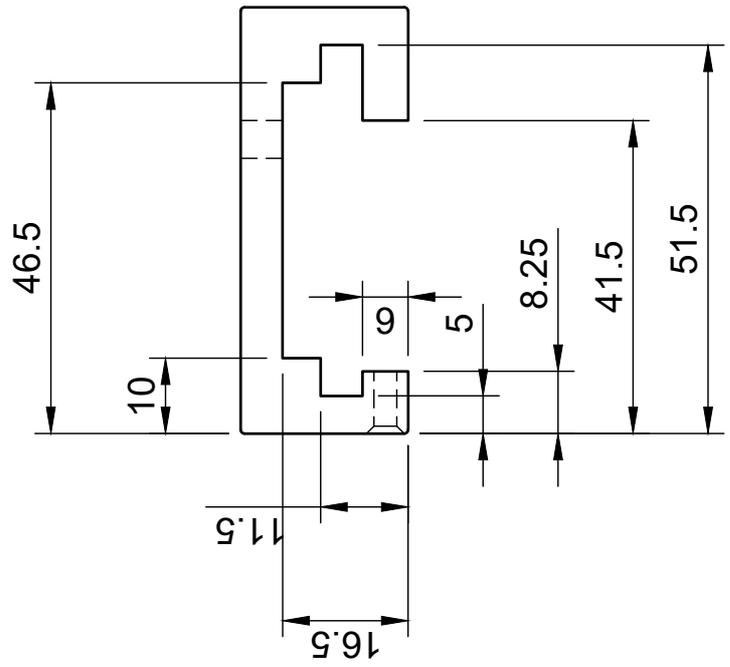
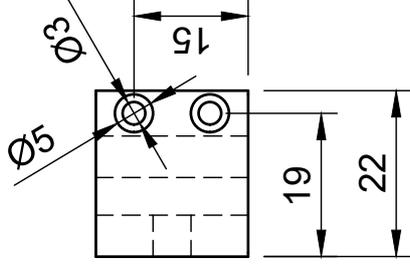
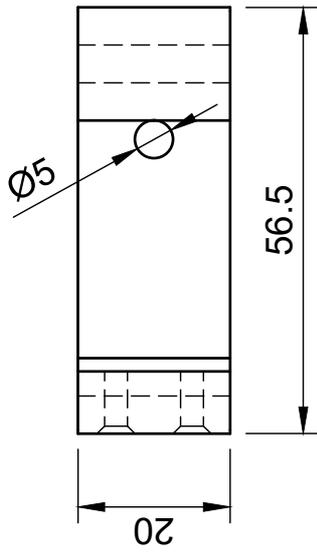
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PIMI-14-04
PLANO PINZA 3 DEDOS: GUIA

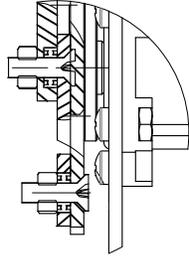
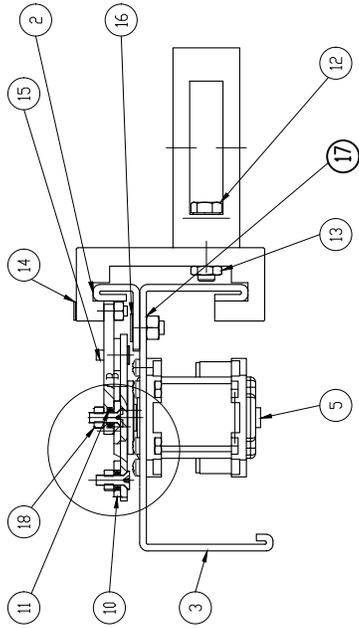
PALANCA



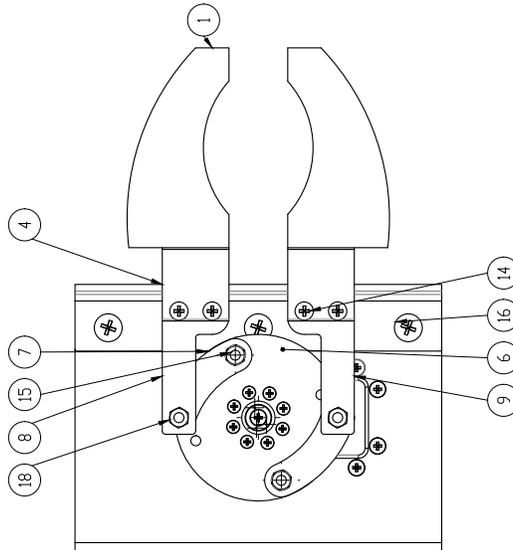
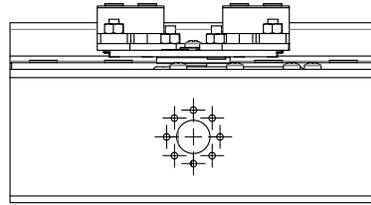
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PIMI-14-04
PLANO PINZA 2 DEDOS: ACOUPLE

SEGUIDOR





B (2 : 1)



18	Tuerca hexagonal m3x0.5	8	Acero Inoxidable	ASME B18.2.1M	
17	Tuerca hexagonal m4x0.7	5	Acero Inoxidable	ASME B18.2.1M	
16	Limón plano cabeza ovalada m3x0.7x10	5	Acero Inoxidable	ASME B18.6.7M	
15	Limón plano cabeza ovalada m3x0.7x10	4	Acero Inoxidable	ASME B18.6.7M	
14	Limón plano cabeza ovalada m3x0.5x15	4	Acero Inoxidable	ASME B18.6.7M	
13	Tuerca hexagonal m3x0.8	2	Acero Inoxidable	ASME B18.2.1M	
12	Perno hexagonal m3x0.8x20	2	Acero Inoxidable	ASME B18.2.1M	
11	Rodamiento de bolas MR63 ZI	4		SKF 6003-2RS	
10	Leva Derecha	1	Aluminio	3393.LPZV.304	
9	Palanca Derecha	1	Aluminio	3393.LPZV.306	
8	Palanca Izquierda	1	Aluminio	3393.LPZV.307	
7	Leva Izquierda	1	Aluminio	3393.LPZV.305	
6	Adaptador de Servomotor	1	Aluminio	3393.LPZV.302	
5	Servomotor MX28-R	1		torque 2.5 Nm	
4	Seguidor	2	Aluminio	3393.LPZV.309	
3	Soporte de Pinza	1	Aluminio	3393.LPZV.308	
2	Guía para Pinza	1	Aluminio	3393.LPZV.301	
1	Dedo de Pinza	2	Aluminio	3393.LPZV.303	
N°	DENOMINACION	Conti	MATERIAL	NORMA	NOTAS
E.P.N.	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		DibVerónica F. López Ch	PLANO	Escal: 1:1
			Rev		
	PINZA DE DOS DEDOS		3393.LPZV.003		FECHA: 28/6/12

ANEXO III

ROBÓTICA

PRÁCTICA N°

1. TEMA

PALETIZACIÓN CON UN ROBOT CON ARQUITECTURA ANTROPOMÓRFICA DE 5 GDL (CINEMÁTICA INVERSA).

2. OBJETIVOS

- 2.1. Obtener el modelo cinemático inverso de un robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL robot PIMI 14-04.
- 2.2. Validar el modelo cinemático inverso mediante la comparación de las coordenadas cartesianas del modelo con las del robot real en una determinada posición.
- 2.3. Realizar tareas de paletización con un robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL robot PIMI 14-04.

3. MARCO TEÓRICO

El robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL robot PIMI 14-04 (Figura 3.1) que se usa en esta práctica es el que se realizó su control en el trabajo de integración curricular “Control de un robot con arquitectura antropomórfica de cinco grados de libertad que realice tareas de paletización”.

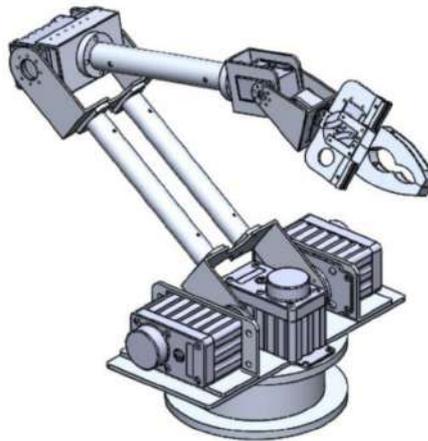


Figura 3.1. Robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL robot PIMI 14-04.

El modelo cinemático inverso del robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL permite obtener la relación entre las coordenadas del efector final y los ángulos de cada articulación. Dentro de los diferentes métodos utilizados para determinar el modelo cinemático inverso de un robot manipulador se tiene el algoritmo de Denavit-Hartenberg (D-H). El algoritmo de Denavit-Hartenberg utiliza matrices de transformación homogénea para establecer el modelo a partir de la ubicación de sistema de referencia en cada articulación e identificado sus eslabones y sus dimensiones.

Para la obtención de las ecuaciones de la cinemática inversa se debe tener en cuenta la ubicación de cada uno de los ejes y el diagrama del robot mostrado en la Figura 3.2.:

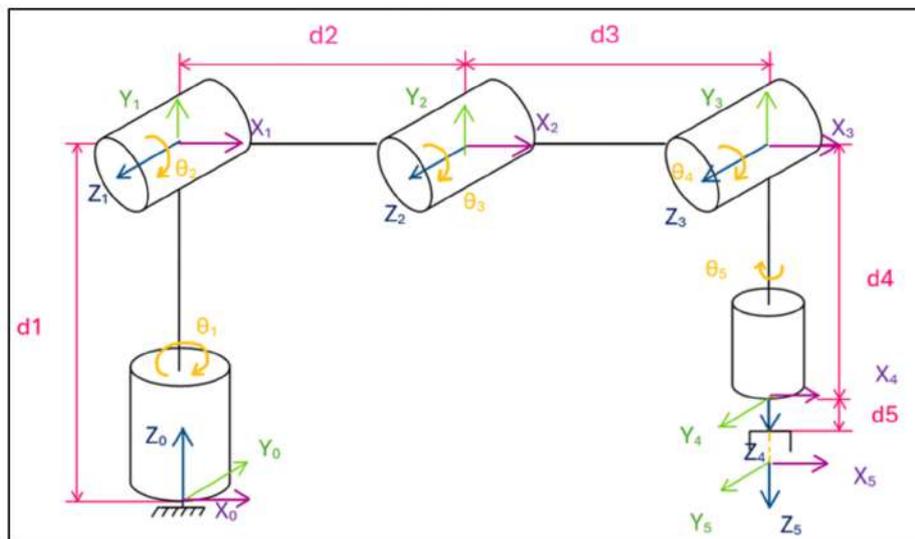


Figura 3.2. Esquema del robot antropomórfico de 5 GDL robot PIMI 14-04.

Donde:

$$d_1 = 11 \text{ cm}$$

$$d_4 = 7 \text{ cm}$$

$$d_2 = 35,00 \text{ cm}$$

$$d_5 = 16,00 \text{ cm}$$

$$d_3 = 31,00 \text{ cm}$$

Para definir las matrices de transformación de la articulación i con respecto al sistema de referencia $i - 1$ se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Donde T_i^{i-1} es la matriz que relaciona el i -ésimo eslabón con respecto al eslabón anterior ($i - 1$). La ecuación (3.1) depende de los parámetros θ_i , α_i , d_i y a_i los cuales se definen para cada articulación en base a la convención de D-H.

Las matrices de transformación homogénea necesarias para la obtención del modelo cinemático inverso son:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & d_2 * \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & d_2 * \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & d_3 * \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & d_3 * \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 + d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

4. TRABAJO PREPARATORIO

- 4.1. Determinar el modelo cinemático inverso de los primeros 3 grados de libertad (Θ_1 , Θ_2 , Θ_3) del robot con arquitectura antropomórfica de 5 GLD (Descrito en el marco teórico) mediante Denavit-Hartenberg.
- 4.2. Determinar el modelo cinemático inverso de los grados de libertad 4 y 5 (Θ_4 y Θ_5).

Nota: Para los ángulos de los grados de libertad de Θ_4 y Θ_5 se realiza un análisis geométrico ya que debido a la naturaleza de la aplicación se desea que el efector final este siempre perpendicular al plano XY y paralelo al eje de coordenadas Y. Para este fin se debe realizar un análisis en el plano XZ para obtener el ángulo Θ_4 y también analizar en el plano XY para obtener el ángulo Θ_5 . Los planos se muestran en las Figuras 4.1 y 4.2.

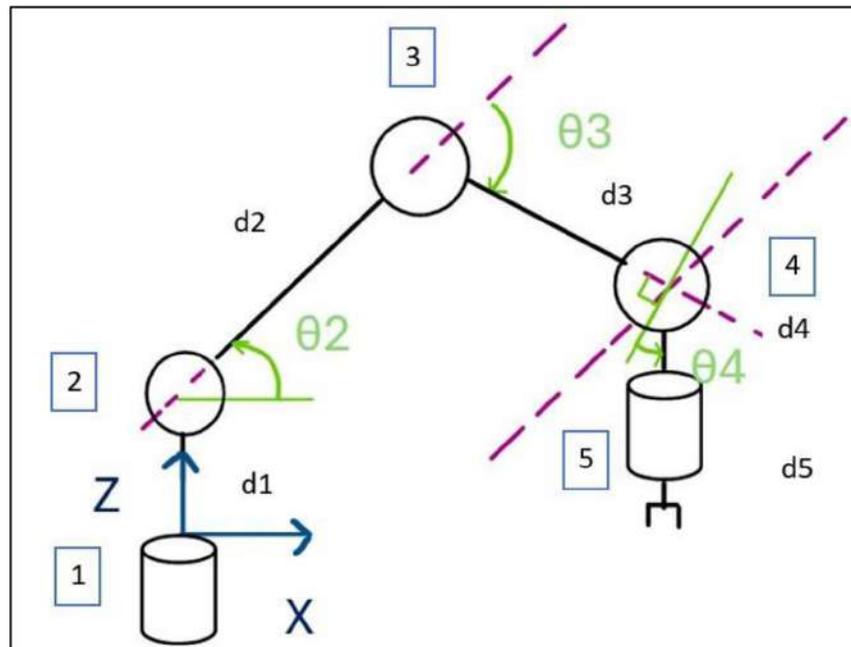


Figura 4.1. Esquema del robot antropomórfico de 5 GDL (perspectiva XZ).

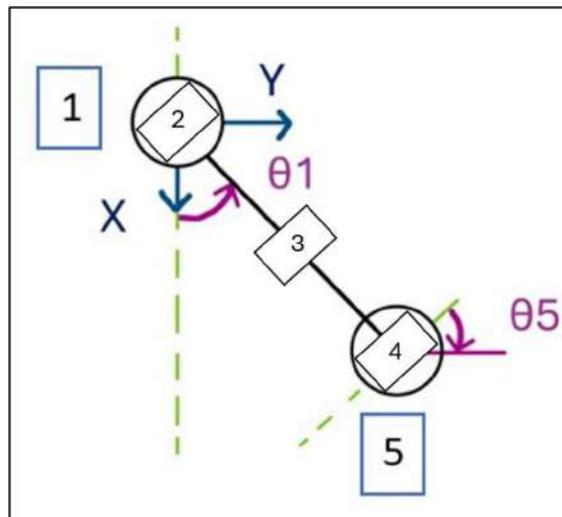


Figura 4.2. Esquema del robot antropomórfico de 5 GDL (perspectiva XY).

- 4.3. Consultar y realizar un resumen del “Manual de usuario para paletización con el robot antropomórfico de 5 GDL”.
- 4.4. Tomando en cuenta las consideraciones del manual de usuario realizar un script donde se ingrese la cinemática inversa obtenida en los literales 4.2. y 4.1. Nombrar el script como “CinemáticaInversa.m”.

5. EQUIPO Y MATERIALES

Equipo

- Computador
- Robot PIMI-14-04.
- Fuente de 12v y 24v.
- Flexómetro.

Software

- Matlab-Simulink
- Visual STUDIO

6. PROCEDIMIENTO

6.1. El instructor dará una introducción acerca de la paletización con el robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL Robot PIMI-14-04 y una demostración de su funcionamiento utilizando la interfaz gráfica.



Fig. 6.1. Interfaz gráfica para paletización.

6.2. El script desarrollado en el literal 4.4. copie a la carpeta "Programas Paletización".

6.3. Se comprobará el modelo cinemático inverso obtenido llenando la Tabla 6.1. y Tabla 6.2:

(Nota: cada estudiante realizará tareas de paletización con el robot PIMI 14-04 2 veces, deberá anotar los ángulos enviados al robot, los ángulos de la realimentación, la posición XYZ real y la posición XYZ obtenida mediante la cinemática inversa)

Tabla 6.1. Datos de posiciones

Posición inicial (HMI)	Posición inicial (REAL)	Posición final (HMI)	Posición final (REAL)
X:			
Y:			
Z:			
X:			
Y:			
Z:			

Tabla 6.2. Datos de ángulos

Ángulos iniciales enviados al robot	Ángulos iniciales recibidos del robot	Ángulos finales enviados al robot	Ángulos finales recibidos al robot
GDL1: GDL2: GDL3: GDL4: GDL5: Pinza:			
GDL1: GDL2: GDL3: GDL4: GDL5: Pinza:			

7. INFORME

- 7.1. Realizar un resumen del procedimiento realizado en la práctica, adjuntando el modelo cinemático inverso del robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL Robot PIMI-14-04 (código de Matlab) y las capturas de pantalla de la interfaz de usuario cuando se realizaron las mediciones.
- 7.2. Realizar el cálculo de errores de ángulos, en caso de que existan diferencias significativas justifique lo ocurrido.
- 7.3. Realizar el cálculo de errores de posiciones en XYZ, en caso de que existan diferencias significativas justifique lo ocurrido.
- 7.4. Conclusiones (Individuales)
- 7.5. Recomendaciones (Individuales)
- 7.6. Bibliografía

8. BIBLIOGRAFÍA

Chávez, E. "Control de un robot con arquitectura antropomórfica de cinco grados de libertad que realice tareas de paletización", EPN – FIEE. 2024.

Elaborado por: Erick Chávez

Revisado por: Nelson Sotomayor, MSc
Dr. Paulo Leica

ROBÓTICA

PRÁCTICA N°

1. TEMA

CINEMÁTICA INVERSA DE UN ROBOT CON ARQUITECTURA
ANTROPOMÓRFICA DE 5 GDL

2. OBJETIVOS

- 2.1. Obtener el modelo cinemático inverso de un robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL.
- 2.2. Validar el modelo cinemático inverso mediante la comparación de las coordenadas cartesianas del modelo con las del robot real.
- 2.3. Implementar la cinemática inversa en un proceso de paletizado.

3. MARCO TEÓRICO

El robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL que se usará en esta práctica (robot PIMI 14-04) se muestra en la Figura 3.1 [1].

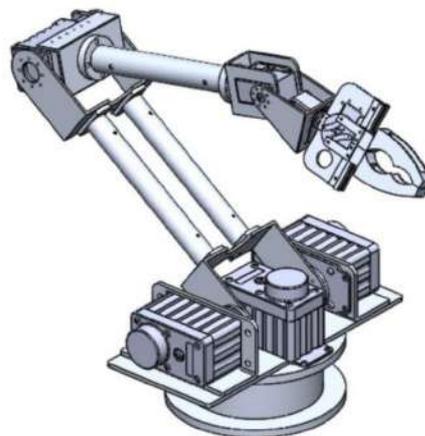


Figura 3.1. Robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL

El modelo cinemático inverso de un robot con arquitectura antropomórfica permite obtener los ángulos de las articulaciones dada la posición del efector final.

Existen algunos métodos para encontrar la cinemática inversa de un robot con arquitectura antropomórfica, los más utilizados son:

Método geométrico: Utiliza relaciones geométricas y trigonometría para calcular los ángulos articulares, ideal para manipuladores con estructuras simples.

Método algebraico: Formula un conjunto de ecuaciones que describen la posición y orientación del efector final y las resuelve para obtener los ángulos articulares.

Jacobiano y pseudo-inversa: Utiliza la matriz Jacobiana para relacionar las velocidades articulares con las del efector final, y la pseudo-inversa del Jacobiano para encontrar los ángulos articulares mediante un proceso iterativo.

Algoritmo de Denavit-Hartenberg (D-H): Este algoritmo utiliza matrices de transformación homogénea para establecer el modelo a partir de la ubicación de sistema de referencia en cada articulación e identificado sus eslabones y sus dimensiones.

Para la obtención de las ecuaciones de la cinemática inversa del robot PIMI-14-04, se debe tener en cuenta la ubicación de cada uno de los ejes y la estructura del robot como se muestra en la Figura 3.2.

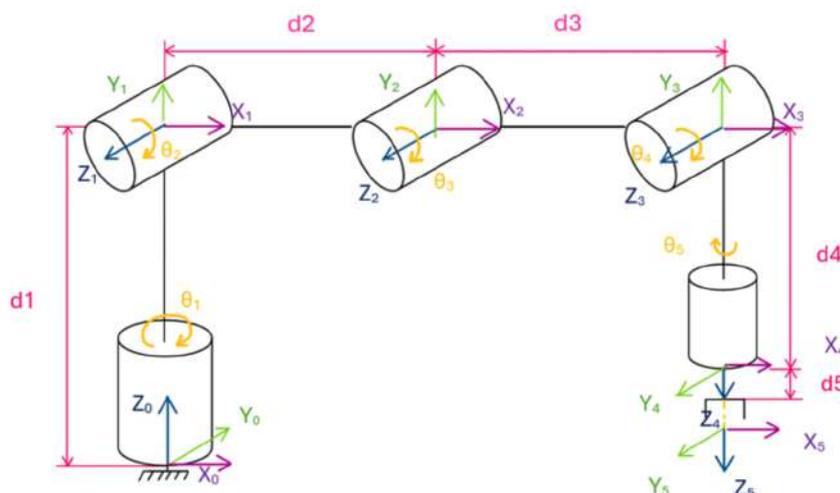


Figura. 3.2. Estructura del robot PIMI 14-04.

En la Tabla 3.1 se indican las distancias de los eslabones:

Tabla 3.1. Distancia de los eslabones del robot PIMI 14-04

Eslabón	Distancia [cm]
d1	11,00
d2	35,00
d3	31,00
d4	7,00
d5	16,00

Para definir las matrices de transformación de la articulación i con respecto al sistema de referencia $i - 1$ se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Donde A_i^{i-1} es la matriz que relaciona el i -ésimo eslabón con respecto al eslabón anterior ($i - 1$). La ecuación (3.1) depende de los parámetros θ_i , α_i , d_i y a_i los cuales se definen para cada articulación en base a la convención de D-H.

Las matrices de transformación homogénea necesarias para la obtención del modelo cinemático inverso son:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & d_2 * \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & d_2 * \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & d_3 * \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & d_3 * \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 + d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

4. TRABAJO PREPARATORIO

- 4.1. Determinar el modelo cinemático inverso de los primeros 3 grados de libertad (Θ_1 , Θ_2 , Θ_3) del robot con arquitectura antropomórfica de 5 GLD (Descrito en el marco teórico) mediante Denavit-Hartenberg.
- 4.2. Determinar el modelo cinemático inverso de los grados de libertad 4 y 5 (Θ_4 y Θ_5).

Nota: Para los ángulos de los grados de libertad de Θ_4 y Θ_5 se realiza un análisis geométrico ya que debido a la naturaleza de la aplicación se desea que el efector final este siempre perpendicular al plano XY y paralelo al eje de coordenadas Y. Para este fin se debe realizar un análisis en el plano XZ cuya perspectiva se observa en la Figura. 4.1. para obtener el ángulo Θ_4 . A su vez, se debe analizar el plano XY para obtener el ángulo Θ_5 , la perspectiva de dicho plano se observa en la Figura. 4.2. La Figura. 4.1. muestra la vista lateral del robot y la Figura.4.2. muestra la vista superior.

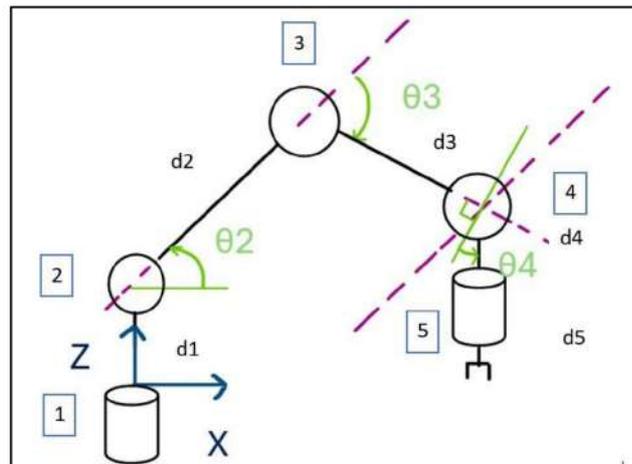


Figura. 4.1. Esquema del robot PIMI 14-04 (perspectiva XZ).

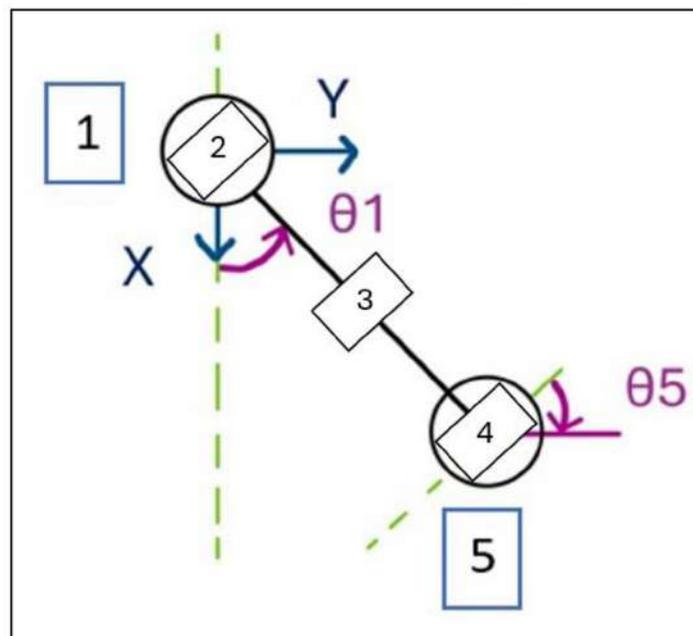


Figura. 4.2. Esquema del robot PIMI-14-04 (perspectiva XY).

5. EQUIPO Y MATERIALES

Equipo

- Computador
- Robot PIMI-14-04.
- Fuente de 12v y 24v.
- Flexómetro.

Software

- Matlab-Simulink
- Visual STUDIO

6. PROCEDIMIENTO

6.1. El instructor explicará la utilidad de la cinemática inversa y cómo se puede utilizar para la paletización con el robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL y una demostración de su funcionamiento utilizando la interfaz gráfica.

6.2. Utilizando la cinemática inversa obtenida en el trabajo preparatorio se calculará los ángulos necesarios para llegar a la posición deseada de la segunda columna de la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Posiciones y ángulos deseados

Nº de posición	Posición efector final [cm]	Ángulos de las articulaciones
1	X=25; Y=-10; Z=2;	$\theta_1=-22$; $\theta_2=82$; $\theta_3=-127$; $\theta_4=44$; $\theta_5=22$; PINZA=160;
2	X=40; Y=-10; Z=2;	$\theta_1=-14$; $\theta_2=63$; $\theta_3=-98$; $\theta_4=36$; $\theta_5=14$; PINZA=160;
3	X=40; Y=5; Z=2;	$\theta_1=7$; $\theta_2=64$; $\theta_3=-100$; $\theta_4=36$; $\theta_5=-7$; PINZA=160;
4	X=25; Y=5; Z=2;	$\theta_1=11$; $\theta_2=84$; $\theta_3=-129$; $\theta_4=45$; $\theta_5=-11$; PINZA=160;

En la segunda columna de la Tabla 6.2. se debe colocar la posición del efector final medida (real), en la tercera columna los ángulos que se calcularon con la cinemática inversa (los cuales se ingresan en el HMI) y en la cuarta columna se escribirá la realimentación de posición que entrega el HMI.

Tabla 6.2. Datos de la práctica

Posición XYZ deseada	Posición XYZ medida (real)	Ángulos calculados con la cinemática inversa °	Ángulos recibidos del robot °
X=25; Y=-10; Z=2;	X= Y= Z=	θ1: θ2: θ3: θ4: θ5:	θ1: θ2: θ3: θ4: θ5:
X=40; Y=-10; Z=2;	X= Y= Z=	θ1: θ2: θ3: θ4: θ5:	θ1: θ2: θ3: θ4: θ5:
X=40; Y=5; Z=2;	X= Y= Z=	θ1: θ2: θ3: θ4: θ5:	θ1: θ2: θ3: θ4: θ5:
X=25; Y=5; Z=2;	X= Y= Z=	θ1: θ2: θ3: θ4: θ5:	θ1: θ2: θ3: θ4: θ5:



Figura 6.1. Interfaz control manual de los motores

7. INFORME

- 7.1. Realizar un resumen del procedimiento realizado en la práctica, adjuntando el modelo cinemático inverso del robot con arquitectura antropomórfica de 5 GDL y las capturas de pantalla de la interfaz de usuario cuando se realizaron las mediciones.
- 7.2. Realizar el cálculo de errores de ángulos, en caso de que existan diferencias significativas justifique lo ocurrido.
- 7.3. Realizar el cálculo de errores de posiciones en XYZ, en caso de que existan diferencias significativas justifique lo ocurrido.
- 7.4. Conclusiones (Individuales)
- 7.5. Recomendaciones (Individuales)
- 7.6. Bibliografía

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] E Chávez. "Control de un robot con arquitectura antropomórfica de cinco grados de libertad que realice tareas de paletización", Quito: EPN – FIEE, 2024.

Elaborado por: Erick Chávez

Revisado por: Nelson Sotomayor, MSc
Dr. Paulo Leica