

CONESCAPANHONDURAS2025paper41.pdf

 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Document Details

Submission ID

trn:oid:::14348:477771003

Submission Date

Jul 31, 2025, 11:49 PM CST

Download Date

Aug 12, 2025, 2:26 PM CST

File Name

CONESCAPANHONDURAS2025paper41.pdf

File Size

620.7 KB

6 Pages




4,069 Words

20,585 Characters

6% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 5%  Internet sources
- 1%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags




0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 5%  Internet sources
- 1%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	riunet.upv.es	2%
2	Internet	www.veranoregional.org	<1%
3	Internet	ojs.southfloridapublishing.com	<1%
4	Internet	core.ac.uk	<1%
5	Internet	dokumen.pub	<1%
6	Internet	es.scribd.com	<1%
7	Publication	"Design and control algorithm of a motion sensing-based fruit harvesting robot", ...	<1%
8	Internet	doczz.es	<1%
9	Internet	www.coursehero.com	<1%
10	Internet	www.aulamedica.es	<1%
11	Internet	zagan.unizar.es	<1%

Diseño e implementación de un Robot de 3 DOF para pulido de superficies

Resumen—Este proyecto consiste en el diseño e implementación de un robot articulado de tres grados de libertad (DOF) para realizar tareas de pulido en una pizarra acrílica. El sistema emplea un análisis teórico-matemático para describir el robot, incluyendo la cinemática directa e inversa, el cálculo de velocidades y fuerzas, así como la generación de trayectorias controladas. Se utiliza el método de Denavit-Hartenberg para modelar el robot, permitiendo la definición de sus parámetros, como los ángulos y desplazamientos de las articulaciones. Además, se analizan las fuerzas y torques aplicados en las articulaciones para garantizar la correcta ejecución de la tarea de pulido. En la implementación física, el robot utiliza motores paso a paso y servomotores controlados por un microcontrolador Arduino UNO R3. Los resultados experimentales mostraron que el robot es capaz de realizar la tarea de manera efectiva, aunque se observaron algunos fallos debido a los componentes electrónicos.

Palabras Clave—Grados de libertad (DOF), cinemática, puntos vía, Denavit-Hartenberg (D-H), Jacobiano, trayectorias

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la tecnología llega a superar los límites tal y como se conocen, ya que en ella se diseñan y se implementan con conocimientos ingenieriles, sistemas y mecanismos automatizados para poder ejecutar tareas que usualmente a un ser humano se le hacen complicadas de realizar o que pueden resultar peligrosas. Entre estas tecnologías se encuentra el IoT (internet de las cosas), la industria 4.0, los sistemas CPS (sistemas ciberfísicos) y la robótica, la cual implementa cada una de estas tecnologías. [1]

La robótica es considerada una disciplina que involucra el diseño, construcción y operación de robots. Esta disciplina combina conceptos en áreas como la computación, electrónica y mecatrónica para poder crear máquinas capaces de realizar tareas de forma automática, similares a comportamientos humanos. [1] [2]

Dentro de esas tecnologías, y como parte de los conocimientos mecatrónicos, se encuentran los robots industriales. Estos son conocidos como manipuladores multifuncionales, reprogramables y controlados para el uso de la automatización industrial, según la norma ISO 8373:2012. A pesar de que los robots industriales no tienen una forma humanoide, lo cual muchas personas creen, estos son capaces de reproducir movimientos y comportamientos humanos, pero con más fuerza, precisión y rapidez. En torno a ellos, y a pesar de realizar tareas intensivas y de ser colocados en posiciones fijas dentro de lo que es una planta industrial, alrededor de ellos giran lo que son el resto de tareas y procesos que ejecutan los demás trabajadores, ya

que estas máquinas pueden requerir mantenimiento o apoyo de un trabajador para realizar la tarea de forma exitosa. [3] [4]

Para la elaboración, diseño e implementación de los robots industriales, es necesario realizar un estudio previo, denominado estudio cinemático. El estudio cinemático de un robot es el análisis del movimiento del mismo sin considerar las fuerzas que lo causan. Este está enfocado en la relación de coordenadas de las articulaciones, posición y orientación desde la base hasta el efector final del robot. [1]

En este proyecto, se busca plantear, diseñar e implementar un brazo robótico articulado para realizar el pulido de una pieza. Esta labor representa una tarea común en la industria que se puede automatizar mediante sistemas robóticos. La labor específica que debe realizar el robot para ejemplificar la tarea es borrar un cuadro de 10x10 cm de una pizarra acrílica. Se tienen objetivos como: aplicar los conceptos teóricos de orientación, posición, cinemática, velocidades y fuerzas para brazos robóticos aprendidos durante el curso y manipular mecanismos robóticos para la solución de tareas comunes en la industria.

II. DISEÑO FÍSICO Y ELÉCTRICO DEL ROBOT

II-A. Diseño y diagrama físico

Para la implementación del robot, se utilizó un robot previamente diseñado como proyecto de graduación en la universidad; sin embargo, se tuvo que hacer una revisión de los componentes, así como la sustitución de algunos de ellos, y se consideran algunas variaciones para adaptar el robot a la tarea a realizar, tanto para el análisis teórico-matemático como para la funcionalidad.

Como se puede observar en la Figura 1, el robot consiste en un sistema mecánico de 4 articulaciones y 4 enlaces, con la diferencia de que para la realización de la tarea solo serán necesarias 3 articulaciones (articulación 1, 2 y 4) del primer diagrama; por eso se considera un robot de 3 DOF.

Además, se pueden observar los valores de las dimensiones y de los sistemas de referencia aplicados en cada una de las articulaciones para poder comprender la rotación y desplazamiento que el robot es capaz de realizar, y así delimitar un área de trabajo.

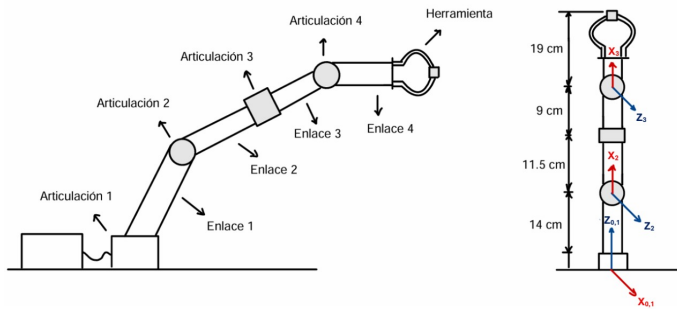


Figura 1: Diagrama general para Robot Pulidor de 3 DOF

Para el caso del área de trabajo, es importante conocer los ángulos máximos que son capaces de alcanzar cada una de las articulaciones, esto viene dado por los motores. Para ello, se procedió a medir la rotación máxima que cada una de las articulaciones realiza de forma aproximada, los resultados de los 3 ángulos obtenidos se encuentran en la Tabla I.

Tabla I: Valores máximos de los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 .

Parámetro	Valor
$\theta_{1\max}$	285°
$\theta_{2\max}$	230°
$\theta_{3\max}$	220°

II-B. Diseño y diagrama eléctrico

Para el diagrama eléctrico del robot, se utilizaron en su mayoría los componentes originales del brazo y cambiando la fuente que estaba dañada por dos fuentes externas de 12 V y 5 V, estos se usaron para poder programar al robot y que este, a través de su sistema mecánico, pueda moverse para realizar la tarea deseada.

Los componentes del diseño eléctrico del robot son los siguientes:

- Microcontrolador Arduino UNO R3: Microcontrolador utilizado para ser programado con las instrucciones y acciones que debe realizar cada actuador del robot, mediante este se crea la generación de trayectorias.
- Screw Terminal Block Breakout Module: este módulo corresponde a una extensión para el microcontrolador utilizado en el proyecto, el cual contiene la asignación de pines del Arduino, para poder conectarlos con cables AWG 22 y jumpers macho.
- Motor Stepper 42BYGHM809: Motor utilizado para la articulación 2 del robot, el cual corresponde a un motor de pasos de 400 pasos por revolución y con configuración bipolar para poder rotar en ambas direcciones.
- Driver para motor Stepper TB6600: Este módulo es un controlador específicamente diseñado para motores a pasos, este se alimenta con un voltaje de 12 V proveniente de una fuente externa, y es capaz de controlar su rotación

en ambos sentidos según lo requerido. Además, el controlador tiene funciones de seguridad como protección contra sobrecorriente, desconexión por bajo voltaje y sobrecalentamiento. [5]

- Servomotores: Utilizados para movilizar las demás articulaciones del robot (articulación 1 y 3). Estos motores tienen un torque máximo de 2.5 kgf/cm, y son alimentados con 5 V a través de una fuente externa. Están conectados directamente a los pines digitales del arduino para su funcionamiento, y programados a moverse una cantidad de grados específica, según la función de cada uno de ellos.
- Placa para soldar: Placa que contiene las conexiones a alimentación y a tierra (GND) de los componentes conectados al Arduino.
- Jumpers y cable AWG 22 para protoboard

El diagrama de conexiones eléctricas se muestra en la siguiente figura 2.

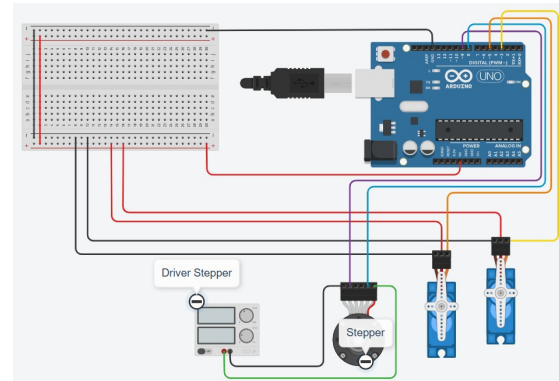


Figura 2: Diagrama de conexiones eléctricas de Robot Pulidor de 3 DOF

III. ESTUDIO CINEMÁTICO DEL ROBOT

Para el estudio cinemático del robot, se procedió a realizar un estudio completo del mismo, tanto para articulaciones como enlaces y los movimientos para poder realizar la tarea deseada. Para ello, se aplicaron métodos como los parámetros de Denavit-Hartenberg, cinemática directa, ecuaciones de cinemática inversa, matriz Jacobiana a través de las velocidades, fuerzas y torques aplicados en sus articulaciones, y finalmente puntos de trabajo y trayectorias libres o lineales.

III-A. Parámetros de Denavit-Hartenberg

Para los parámetros de D-H se procedió a analizar los sistemas de referencia del robot en cada una de las articulaciones. Como se pudo observar en la Figura 1, este robot se compone de 3 DOF, correspondientes a las articulaciones 1, 2 y 4, donde cada uno de estos tiene un sistema de referencia respecto a la rotación de la articulación respecto al eje Z. Por lo tanto, de acuerdo con los sistemas de referencia, orientaciones y dimensiones del robot, se obtuvieron los parámetros mostrados en la Tabla II.

Tabla II: Parámetros de Denavit-Hartenberg para Robot de 3DOF

i	θ_i	$d_i[mm]$	$a_{i-1}[mm]$	α_{i-1}
1	θ_1	0	0	0
2	θ_2	14	0	-90°
3	θ_3	0	20.5	0

III-B. Cinemática Directa

Para la cinemática directa es importante tomar en cuenta los parámetros de D-H obtenidos previamente. Para el robot, se pueden encontrar las matrices de transformación homogénea para cada una de las articulaciones analizadas de manera directa, según los parámetros de D-H. Aplicando la ecuación correspondiente, se obtienen las siguientes matrices:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 14 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & 20.5 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Como aclaración con las matrices de transformación homogéneas, la nomenclatura de "s" y "c" corresponde a seno y coseno respectivamente, como abreviatura de las funciones trigonométricas en cada una de las matrices resultantes.

Con las matrices de transformación homogénea de las Ecuaciones 1, 2 y 3, se puede obtener la matriz de transformación homogénea compuesta, la cual sería la matriz de transformación desde la base hasta la punta de la herramienta del robot, la cual se obtiene multiplicando las matrices una por una de derecha a izquierda. Este cálculo se observa en la Ecuación 4 en donde se multiplican las matrices obtenidas previamente.

$${}^0T_3 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \quad (4)$$

La matriz compuesta de transformación homogénea desde la base hasta la punta del robot obtenida se muestra a continuación:

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 & -c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - c\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 & -s\theta_1 & 20.5c\theta_1 c\theta_2 - 14s\theta_1 \\ s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 & -s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 & c\theta_1 & 20.5s\theta_1 c\theta_2 + 14c\theta_1 \\ -s\theta_2 c\theta_3 - c\theta_2 s\theta_3 & s\theta_2 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3 & 0 & -20.5s\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

III-C. Cinemática Inversa

Para la cinemática inversa se decidió utilizar el método algebraico para encontrar las ecuaciones correspondientes de los ángulos en cada una de las articulaciones para valores deseados de rotación y desplazamiento del robot según la tarea que se desea realizar. Para ello se tomaron de la matriz

3X1 de desplazamiento de la matriz compuesta del robot, las componentes de X, Y y Z.

$$x = 20.5c\theta_1 c\theta_2 - 14s\theta_1 \quad (6)$$

$$y = 20.5s\theta_1 c\theta_2 + 14c\theta_1 \quad (7)$$

$$z = -20.5s\theta_2 \quad (8)$$

Para este análisis, se determinaron los valores correspondientes de X, Y y Z, ya que estas delimitan las posiciones deseadas para la posición inicial de ataque del robot para empezar la tarea. Se busca que el robot se posicione en la esquina superior izquierda, por lo que los valores correspondientes de las posiciones son X = 0 cm, Y = 15 cm, y Z = -12 cm. Estos valores se deben a que el robot debe desplazarse 6 cm en Y, contemplando el largo de la herramienta y la distancia de 15 cm entre el sistema de referencia del robot y la pizarra. Y el valor de 12 cm desplazado hacia abajo en Z es debido a que el robot debe desplazarse a la esquina del robot.

Para ello, utilizando la Ecuación 8, se puede despejar el valor de θ_2 y se puede encontrar el ángulo de la articulación 2 inicial por medio de la Ecuación 9.

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{-z}{20.5} \right) \quad (9)$$

$$\theta_2 = 47.03^\circ$$

Para encontrar el valor de θ_1 , se debe utilizar tanto el valor de las componentes de X y Y, como el valor de θ_2 obtenido previamente. Para ello, se utiliza la fórmula de atan2, la cual es la relación de las Ecuaciones 6 y 7, con los valores de X y Y respectivamente, y esta ecuación se observa en la Ecuación 10.

$$\theta_1 = \arctan 2 (y - L_1 \cdot \cos(\theta_2), x + L_1 \cdot \sin(\theta_2)) \quad (10)$$

$$\theta_1 = 27.397^\circ$$

Para el valor de θ_3 , se determinó restando el ángulo phi, que en este caso es la máxima rotación deseada de la articulación 3 y equivale a 180° , y a este se le deben restar los ángulos obtenidos de θ_1 y θ_2 . Finalmente, se le restan otros 180° para cambiar la orientación y así lograr que el robot este en la posición deseada. Esta ecuación se utiliza ya que no hay una ecuación concisa para poder determinar este ángulo. Al ser un robot de 3 DOF se complica la solución de un sistema de ecuaciones de tres incógnitas, ya que la orientación y rotación de las articulaciones son variables en el espacio y no hay una forma de determinar estos valores, lo que hace la cinemática inversa sin una solución concreta de forma teórica con este método. [6]

$$\theta_3 = 180^\circ - \theta_1 - \theta_2 - 180^\circ \quad (11)$$

$$\theta_3 = -74.427^\circ$$

III-D. Matriz del Jacobiano

Para la matriz del Jacobiano utilizando las matrices de transformación homogénea en las Ecuaciones 1, 2 y 3, además de la matriz compuesta del robot, se realizó un análisis de velocidades con el método de propagación.

Con las ecuaciones correspondientes, se obtuvo la matriz de velocidades lineales y angulares del robot, correspondiente a:

$$\begin{bmatrix} {}^0\mathbf{v}_3 \\ {}^0\boldsymbol{\omega}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -20.5s_{\theta_1}c_{\theta_2} - 14c_{\theta_1} & -20.5c_{\theta_1}s_{\theta_2} & 0 \\ 20.5c_{\theta_1}c_{\theta_2} - 14s_{\theta_1} & -20.5s_{\theta_1}s_{\theta_2} & 0 \\ 0 & -20.5c_{\theta_2} & 0 \\ 0 & -s_{\theta_1} & -s_{\theta_1} \\ 0 & c_{\theta_1} & c_{\theta_1} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Por lo tanto, la matriz del Jacobiano encontrado sería:

$${}^0J(\theta) = \begin{bmatrix} -20.5s_{\theta_1}c_{\theta_2} - 14c_{\theta_1} & -20.5c_{\theta_1}s_{\theta_2} & 0 \\ 20.5c_{\theta_1}c_{\theta_2} - 14s_{\theta_1} & -20.5s_{\theta_1}s_{\theta_2} & 0 \\ 0 & -20.5c_{\theta_2} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

III-E. Fuerzas y torques aplicados en articulaciones

En el caso de las fuerzas estáticas y torques aplicados en las articulaciones, estos son importantes para saber cuáles son las fuerzas necesarias que se deben aplicar en cada una de las articulaciones para poder realizar la tarea necesaria. En este caso, es necesario que las tres articulaciones apliquen torques y fuerzas, ya que la tarea de pulido necesita ejercer una fuerza sobre la superficie para poder borrar con éxito el cuadrado.

Con los cálculos realizados mediante las ecuaciones correspondientes se presenta la matriz de fuerzas estáticas y momentos de torsión para el Robot Pulidor de 3 DOF aplicados en cada una de las articulaciones:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} -14c_{\theta_2}c_{\theta_3} + 14s_{\theta_2}c_{\theta_3} & 14c_{\theta_2}s_{\theta_3} - 14s_{\theta_2}s_{\theta_3} & 20.5c_{\theta_2} \\ 20.5s_{\theta_3} & 20.5c_{\theta_3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_x \\ \eta_y \\ \eta_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

III-F. Orientaciones y trayectorias

Para las orientaciones del robot debido al número de articulaciones que se implementan no se puede controlar la orientación, por lo que esta se ajustó mediante el posicionamiento del robot y la asignación de un ángulo fijo en la articulación que no se utiliza. Para las trayectorias, se generan trayectorias lineales y libres para la realización de la tarea.

El movimiento del robot consiste en empezar en la posición inicial en el punto Z = -12 cm con este valor y de forma teórica se calculan los ángulos de cada articulación en esta posición, por lo que en el código el robot realiza una trayectoria libre para ir del punto de reposo a dicho punto inicial ya que simplemente se le indican los ángulos en el punto de inicio y final. El movimiento no tiene ninguna restricción, este además es una aproximación a la zona de trabajo ya que se espera a que el robot llegue a esta posición y luego se inicia con la trayectoria para el borrado. Esta consiste en realizar una trayectoria lineal a través de puntos vía, los cuales consisten en dos puntos uno inicial, otro final y tres puntos vía en el intermedio, teniendo un total de 5 puntos vía por línea.

La trayectoria empieza en la posición inicial mencionada anteriormente y se desplaza entre puntos con una distancia de 2 cm entre ellos describiendo una trayectoria lineal hasta el otro extremo del cuadrado, cuando llega al final de la línea se devuelve con una trayectoria libre hasta el inicio del cuadro, esto para asegurar que la tarea de borrado se realice adecuadamente. Para pasar a la siguiente línea y que el borrado se vaya haciendo también hacia abajo, cuando se llega al inicio del cuadro se vuelve a calcular la cinemática inversa en el código para determinar el punto inicial de la siguiente línea.

IV. RESULTADOS

A partir de la implementación física y la programación para la realización de la tarea específica de pulido, se presentan algunos de los resultados relacionados a lo obtenido en la elaboración del proyecto.

En cuanto a las posiciones y movimiento de las articulaciones los ángulos se calcularon a través de la cinemática inversa aplicada, estos se verificaron tanto teóricamente como mediante el uso de un script de MatLab, sin embargo, en la implementación práctica se tuvo que ajustar el valor de la articulación 3, los valores utilizados se muestran en la Tabla III.

Tabla III: Ángulos obtenidos por cinemática inversa

Articulación	Ángulo
θ_1	47.03°
θ_2	27.397°
θ_3	60°

Respecto a las fuerzas y torques experimentales, estos se determinaron a través de pruebas realizadas con el robot para conocer el punto en que este ejecuta una fuerza normal sobre la superficie necesaria para poder borrar el cuadro y completar la tarea. De las hojas de datos consultadas, el servomotor en la articulación 3 es capaz de generar un torque máximo de 2.3 kgf/cm, el cual, al implementarlo de forma práctica, fue suficiente para realizar la tarea; además, junto con este, los torques de los otros motores pueden soportar el peso del robot y cumplir con el objetivo.

Asimismo, utilizando los ángulos máximos de cada una de las articulaciones y sustituyéndolos en las ecuaciones derivadas del análisis de la matriz de fuerzas estáticas, se obtienen los valores teóricos de las fuerzas y los torques en las articulaciones. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas IV y V respectivamente.

Tabla IV: Fuerzas en el Efecto

Parámetro	Valor
f_x	0.00669 N
f_y	-0.00588 N
f_z	0.00098 N

Tabla V: Torques en las Articulaciones

Parámetro	Valor
τ_1	0.02452 Nm
τ_2	0.4119 Nm
τ_3	0.098 Nm

Asimismo, para la orientación, se posicionó el robot de la siguiente manera, modificando la inclinación de la base y el ángulo de la articulación que no se utiliza para las trayectorias, según la Figura 3.

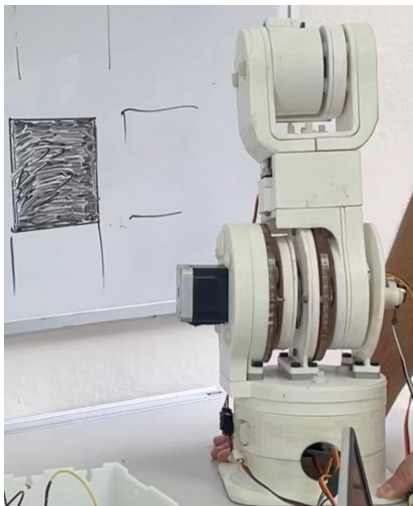


Figura 3: Orientación utilizada para posicionar el robot

Además de esto, en la Figura 4 se presenta un diagrama de las trayectorias utilizadas para cumplir con la tarea, con el objetivo de visualizar de una manera gráfica el trayecto que sigue la herramienta.

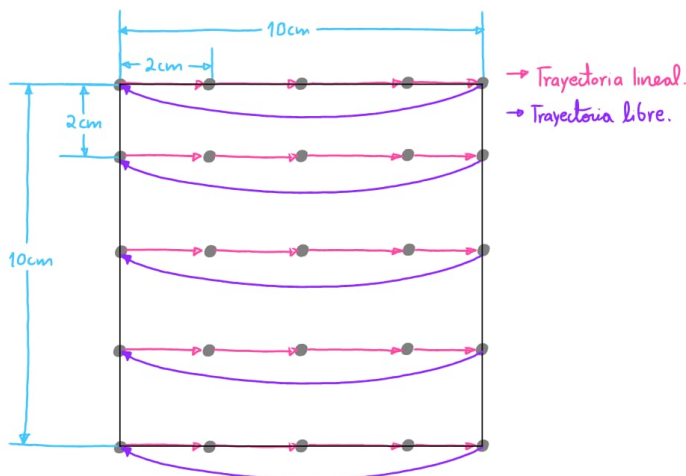


Figura 4: Trayectorias realizadas por el robot

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Respecto a los ángulos obtenidos a través de la cinemática inversa, en la Tabla VI se pueden observar los ángulos obtenidos teóricamente, los obtenidos a nivel experimental, y los porcentajes de error. Se puede observar que los ángulos de θ_1 y θ_2 son iguales, pero el ángulo θ_3 varía respecto al teórico. Esto se debe a que la cinemática inversa, aunque se haya aplicado bien, es impredecible obtener un valor exacto al requerido cuando se tiene un robot de menos de 6 DOF lo que hace que la solución del sistema de ecuaciones sea inexacto, por lo que el ángulo θ_3 se tuvo que ajustar de acuerdo con el movimiento generado del robot. Es decir, para los ángulos de las articulaciones 1 y 2 se pudieron utilizar en la implementación del código directamente los valores generados con cinemática inversa, ya que el movimiento del robot era el adecuado, sin embargo, para la articulación 3 si se tuvo que calibrar o ajustar una pequeña diferencia.

Tabla VI: Comparación de ángulos teóricos y experimentales con su porcentaje de error

Ángulo	Teórico (°)	Experimental (°)	Porcentaje de Error (%)
θ_1	27.397	27.397	0.00
θ_2	47.030	47.030	0.00
θ_3	74.427	65.000	12.7

Por otro lado, con respecto a las fuerzas y torques no se pudo obtener una comparación directa entre los valores teóricos y experimentales, debido a que no se logró medir o determinar un valor experimental, lo que puede afectar en el análisis de los resultados en esta sección. Esto se debe a que no se tuvieron los componentes ni herramientas necesarias para medir los valores de fuerza en la punta de la herramienta, a pesar de esto se verificó que el torque de los componentes que ya tenía el robot fuera suficiente para lograr la trayectoria propuesta y ejercer la presión necesaria para cumplir con el borrado de la pizarra.

De acuerdo con la trayectoria lineal, libre y la aproximación detalladas anteriormente, el robot logró generar una posición de reposo, después trasladarse a una posición inicial con una aproximación, luego realizar la trayectoria lineal buscada, con puntos vía, regresar mediante trayectoria libre y así sucesivamente hasta completar el borrado y devolverse a la posición de reposo. Este método permitió borrar bien el cuadro en su mayoría, sin embargo, en algunas pruebas no se realizaba de la manera correcta debido a que uno de los motores del robot (motor Stepper) en la articulación 2, en algunas ocasiones presentaba errores haciendo que la trayectoria no se realizara adecuadamente. El control de este motor fue afectado debido al sistema mecánico integrado de engranes, el cual llegaba a fallar en la ejecución de la trayectoria del robot, además de que debido a que solo se utilizaron 3 DOF y a las dimensiones del brazo, el manejo de las posiciones y orientaciones se vio más limitado. Por lo tanto, el robot no logró completar la tarea en su totalidad.

VI. CONCLUSIONES

- Se logró crear un modelo matemático para la descripción del robot, lo que permitió obtener resultados que sirvieron para el control del mismo mediante Arduino.
- La aplicación de la cinemática inversa permitió calcular con precisión los ángulos de las articulaciones para alcanzar la posición deseada en su mayoría, con el único detalle de que la articulación 3 se tuvo que ajustar un poco por el largo de la herramienta.
- Los resultados experimentales confirmaron los datos obtenidos y el funcionamiento adecuado del sistema, aunque se presentaron algunos fallos debido al motor stepper. En conclusión, para utilizar este robot o similares se debe tener cuidado al implementar este tipo de motor y si se tienen sistemas de engranes, ya que con el tiempo y el uso pueden llegar a fallar.
- Al analizar los resultados experimentales con los porcentajes de error obtenidos en la Tabla VI, se obtienen resultados satisfactorios y precisos a diferencia de uno de los ángulos que dio un porcentaje de 12.7, lo que refleja que el método de cálculo de cinemática inversa no suele ser el más recomendado para robots de 3 DOF y obtener parcialmente los ángulos.
- Finalmente, se determina que el diseño y modelo del robot de 3 DOF fue relativamente efectivo para realizar la tarea de borrado, ya que logró borrar la mayor parte del cuadro en un tiempo aceptable, validando los conceptos teóricos aplicados y aprendidos durante el curso.

VII. RECOMENDACIONES

- Se debe mejorar la fiabilidad de los componentes electrónicos, especialmente los motores, para evitar fallos durante la ejecución de tareas, debido a que los presentes en el modelo eran componentes un poco viejos.
- Se recomienda realizar una calibración más precisa de los sistemas de referencia del robot para mejorar la precisión en la ejecución de trayectorias complejas.
- Se podrían implementar pruebas adicionales con diferentes posiciones del robot y de las articulaciones, así como mejorar el agarre o el ajuste de la herramienta, y asegurar la base del robot, ya que por el movimiento de los motores esta se va desplazando.

REFERENCIAS

- [1] M. L. I. Peñaranda, O. M. D. Suárez, and M. C. D. Suárez, *Control Cinemático De Un Robot Guiado Por Las Trayectorias De Las Extremidades Superiores Del Humano*, South Florida Journal of Development, 2(1), 871–889, 2021.
- [2] U. O. U. F. de Ingeniería, *Qué es la robótica y cuáles son sus principales usos*. [Online]. Available: <https://fi.ort.edu.uy/blog/que-es-la-robotica-y-cuales-son-sus-usos>
- [3] Robotnik, *¿Qué es un robot industrial? Definición y características 14 marzo 2022—En Logística, Robótica Colaborativa*, 2022. [Online]. Available: <https://robotnik.eu/es/que-es-un-robot-industrial-definicion-y-caracteristicas/>
- [4] I. O. for Standardization, *ISO 8373:2012(en) Robots and robotic devices — Vocabulary*, 2012. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>

- [5] N.D., *Tutorial del TB6600*, 2025. [Online]. Available: https://www.electrogeekshop.com/tutorial-del-tb6600-driver-de-motor-paso-a-paso-con-arduino/?srsltid=AfmBOorAp1XwGNiK4OsIF8XxIc52Vmz_2T-UCvfAWNyL8soSwlBJOody
- [6] K. Ramírez, *Cinemática Inversa del Robot*. [Online]. Available: <https://www.kramirez.net/Robotica/Material/Presentaciones/CinematicaInversaRobot.pdf>