

La Universidad Iberoamericana Puebla a través del

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS E INGENIERIAS

otorga el presente **reconocimiento al proyecto:**

Desarrollo de robot híbrido móvil- manipulador asistido por visión artificial con marcadores ArUco

Autores:

Alejandro Flores Montes, José Pablo Hernández Alonso, Sebastián

Santos Quevedo, Dirk Anton Topcic Martínez, Samuel Villanueva

Jiménez

Por su participación en **EXPO IBERO PRIMAVERA 2025**

San Andrés Cholula, Puebla a 16 de mayo de 2025.



Mtro. Enrique Villa Álvarez

Director del Departamento de Ciencias e Ingenierías

LA VERDAD NOS HARÁ LIBRES

Desarrollo de robot híbrido móvil-manipulador asistido por visión artificial con marcadores ArUco

Flores Montes Alejandro (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)¹, Hernández Alonso José Pablo (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)^{1,*}, Santos Quevedo Sebastián (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)¹, Topcic Martínez Dirk Anton (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)¹, Villanueva Jiménez Samuel (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)¹ y Ochoa García Oliver (profesor responsable)¹.

¹ Universidad Iberoamericana Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México

Introducción

La convergencia entre robótica móvil y manipulación articulada habilita la automatización de tareas complejas al combinar desplazamiento autónomo y destreza fina; esta sinergia ya impulsa procesos industriales de recolección y servicios de asistencia donde la precisión y la adaptabilidad son críticas.

En este trabajo se presenta un robot híbrido: plataforma diferencial de tres ruedas con un brazo de 3 GDL, guiado por visión ArUco. Su diseño fusiona navegación y manipulación en un único marco de coordenadas, desplazándose al objetivo y ejecutando pick-and-place con fiabilidad. El modelo cinemático y dinámico—formulado con Denavit-Hartenberg, Jacobianos y Lagrange—guió el diseño CAD en SolidWorks y la síntesis de engranajes 3 D. Los resultados validan trayectorias suaves y precisas, demostrando un control adaptativo capaz de transportar objetos a posiciones objetivo [1-3].

Metodología



Resultados y discusión

El modelo cinemático, basado en una cadena revoluta alineada y parametrizado con Denavit-Hartenberg, se validó numérica y experimentalmente: el algoritmo en Python, alimentado por la pose de marcadores ArUco, genera trayectorias directas e inversas que el ESP32 ejecuta vía Bluetooth con motores paso a paso..

El prototipo físico respeta el CAD de SolidWorks; todos los eslabones y engranajes PLA se imprimieron en 3 D. La reducción mecánica 3 : 1 elevó la resolución angular de 1,8° a 0,6°, eliminando pérdidas de paso y mejorando la suavidad del movimiento.

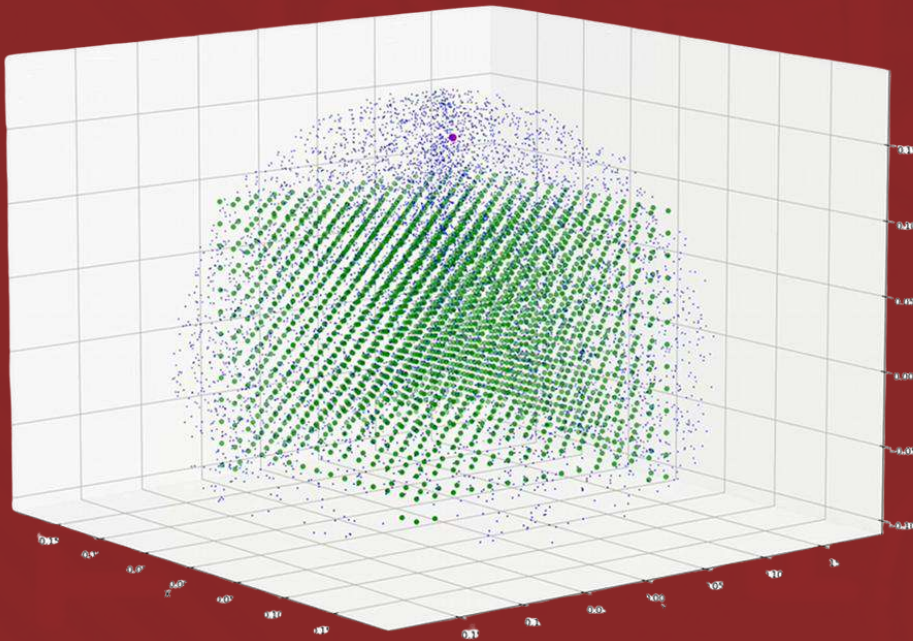


Fig. 2. Espacio de trabajo de manipulador dado por semiesfera con puntos azules; y por puntos verdes para espacio de trabajo lineal.

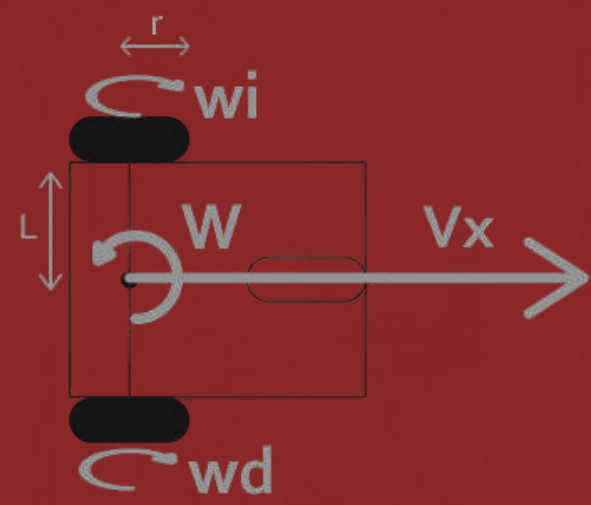


Fig. 3. Diagrama de velocidades de robot móvil.

Durante los ensayos de pick-and-place y navegación, el manipulador reprodujo correctamente las trayectorias generadas, mientras que la base móvil alcanzó los waypoints definidos por los marcadores ArUco con desviaciones dentro del margen operativo previsto [4-6].

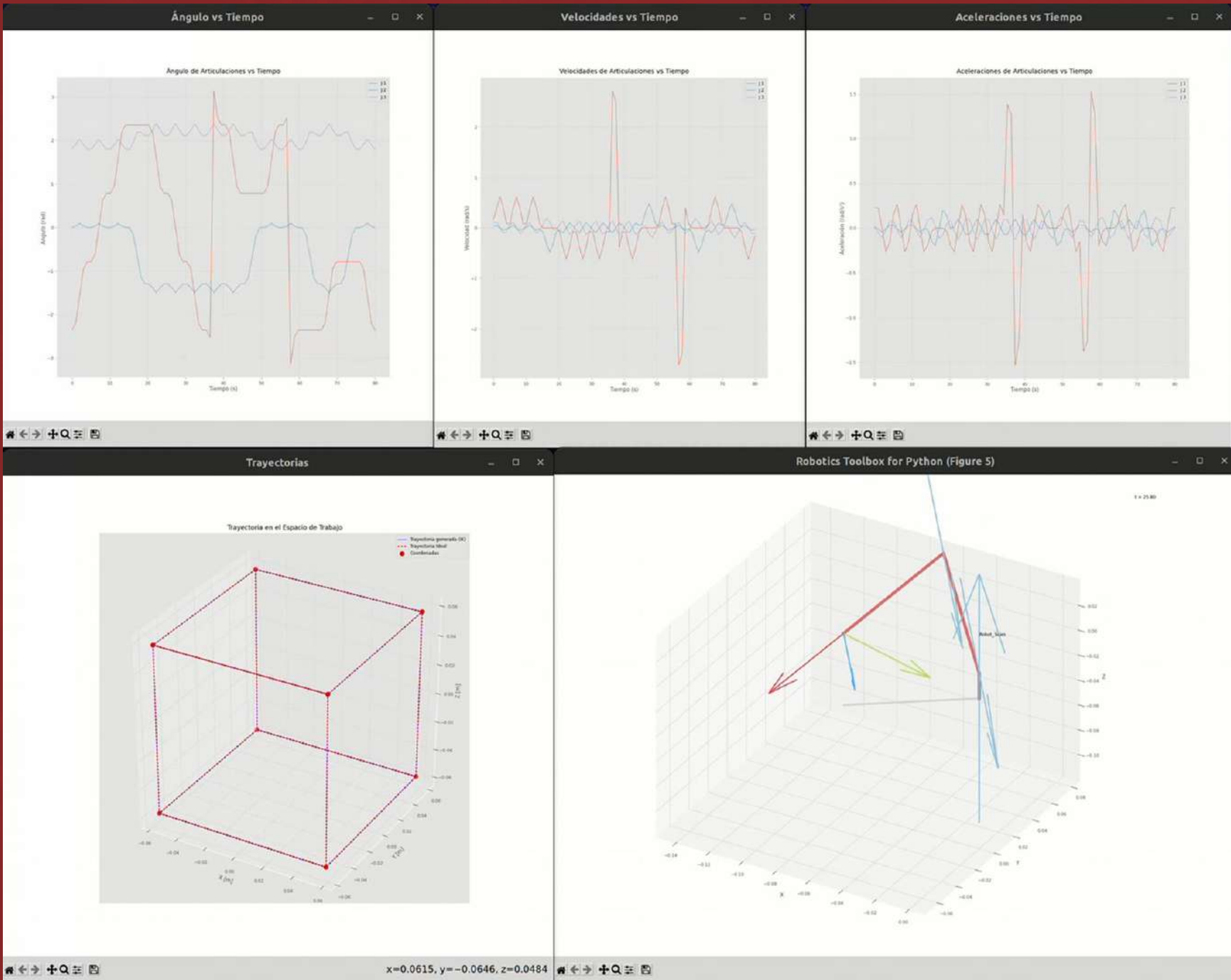


Fig. 4. Análisis de robot mediante programa de control realizado en Python, donde se puede visualizar ángulo, velocidad, aceleración y trayectoria.

La reducción mecánica 3 : 1 y la sincronización maestro-esclavo evitaron pérdidas de paso y garantizaron movimientos suaves, demostrando que la arquitectura móvil-manipulador satisface los requisitos de precisión necesarios para manipular objetos frágiles en entornos controlados.

Conclusiones

- La combinación de plataforma móvil diferencial y brazo de 3 GDL demostró eficacia en tareas de desplazamiento y manipulación de objetos.
- Componentes de bajo costo (NEMA-17, ESP32, piezas PLA) y librerías open-source hicieron el sistema accesible y replicable.
- El flujo CAD, modelo cinemático y control (SolidWorks + Denavit-Hartenberg + Python) garantizó correspondencia entre teoría y hardware.
- La reducción mecánica 3 : 1 potenció la resolución de las articulaciones sin complejidad adicional.
- Visión ArUco y comunicación Bluetooth lograron navegación y manipulación coordinadas.
- El sistema superó las pruebas funcionales de navegación y pick-and-place.



Fig. 5. QR para visualizar videos del proyecto.

Referencias

- [1] S. B. Niku, Introduction to robotics: Analysis, Control, Applications, John Wiley & Sons, 2011.
- [2] J. J. Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control, 1986.
- [3] M. D'Addario, Manual de Robótica Industrial: Fundamentos, Usos y Aplicaciones, Createspace Independent Publishing Platform, 2016..
- [4] S. G. Tzafestas, Introduction to mobile robot control, Elsevier, 2013.
- [5] J. P. Hernández, Portafolio de Robótica, 2025. [En línea] <https://jphajp.github.io/Robotica/> (accedido 10 de abril de 2025).
- [6] P. Corke, Robotics, vision and control: Fundamental Algorithms in MATLAB, Springer, 2012.

Desarrollo de robot híbrido móvil-manipulador asistido por visión artificial con marcadores ArUco

Flores Montes Alejandro (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)¹, Hernández Alonso José Pablo (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)^{1,*}, Santos Quevedo Sebastián (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)¹, Topcic Martínez Dirk Anton (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)¹, Villanueva Jiménez Samuel (décimo semestre en Ingeniería Mecatrónica)¹ y Ochoa García Oliver (profesor responsable)¹.

¹ *Universidad Iberoamericana Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México*

Palabras clave: Robótica, Denavit-Hartenberg, Control.

***Autor Corresponsal:** josepablo.hernandez@iberopuebla.mx

Introducción

Dentro de las múltiples áreas de desarrollo de la robótica, la integración de robots móviles con sistemas manipuladores representa un avance significativo en la automatización de tareas complejas, al combinar capacidades de desplazamiento autónomo con manipulación precisa. Esta sinergia ha permitido extender el rango de aplicaciones prácticas, por ejemplo, en procesos industriales de recolección automatizada y tareas de asistencia.

Este proyecto tiene como finalidad el diseño e implementación de un sistema robótico compuesto por una plataforma móvil de tres ruedas y un brazo robótico articulado de tres ejes montado sobre la misma. La arquitectura del sistema permite el desplazamiento hacia ubicaciones específicas y la manipulación de objetos mediante un sistema de coordenadas absolutas, visión por computadora basada en marcadores ArUco y sensores de giro.

Tanto el brazo manipulador como la plataforma móvil fueron diseñados y modelados en SolidWorks, basándose en análisis cinemático directo e inverso mediante el método de Denavit-Hartenberg, interpolación por trayectorias, trigonometría, así como el análisis de velocidades a través de matrices Jacobianas y evaluación dinámica por el método de Lagrange [1-3].

El sistema desarrollado permite la navegación autónoma y la ejecución de tareas básicas de manipulación, orientadas a la recolección y traslado de objetos hacia posiciones objetivo, utilizando un control dinámico y adaptativo.

Metodología

El desarrollo del sistema robótico se estructuró a partir de una serie de etapas interrelacionadas que abarcaron desde el modelado cinemático hasta la validación experimental del prototipo. Inicialmente, se realizó el análisis cinemático y dinámico del brazo robótico de tres grados de libertad, utilizando el método de Denavit-Hartenberg para determinar tanto la cinemática directa como la inversa, así como la obtención del Jacobiano para el análisis de velocidades articulares y la formulación del modelo dinámico a través del método de Lagrange [4, 5]. Posteriormente, se llevó a cabo el diseño mecánico del brazo robótico, modelando los eslabones, la base y los componentes de transmisión en SolidWorks, donde además se sintetizaron engranajes de transmisión impresos en 3D con una relación de reducción de 3:1, con el fin de optimizar la resolución y el control de las articulaciones. Paralelamente, se diseñó la plataforma móvil diferencial, compuesta por dos ruedas motrices y una rueda pasiva, definiendo su configuración estructural y cinemática.

La programación de los motores del brazo robótico se implementó en Arduino, utilizando un microcontrolador ESP32 para gestionar el control de posición de los motores paso a paso a través de comunicación Bluetooth. En cuanto al sistema de percepción, se integró un módulo de visión por computadora mediante la detección y localización de marcadores ArUco utilizando una cámara web y procesamiento de imágenes en Python con la librería OpenCV, complementado con técnicas de calibración intrínseca y extrínseca para mejorar la precisión posicional. A partir de la información visual obtenida, se diseñó un sistema de planificación de trayectorias, interpolando puntos en el espacio cartesiano para el manipulador y generando rutas de navegación para la plataforma móvil basadas en posiciones objetivo identificadas mediante los marcadores.

El control general del sistema se estructuró mediante un esquema maestro-esclavo, donde el ordenador ejecutaba las rutinas principales en Python, enviando comandos a través de Bluetooth al ESP32, el cual gestionaba la ejecución de los movimientos. La validación experimental consistió en pruebas de precisión y repetibilidad de las trayectorias articuladas, evaluando la capacidad del brazo para alcanzar posiciones objetivo, así como pruebas de navegación autónoma de la plataforma móvil, alcanzando puntos de referencia. Finalmente, se realizó la integración completa de los subsistemas, permitiendo la operación simultánea y coordinada del manipulador y de la base móvil para la ejecución de misiones de recolección y traslado de objetos. Todas las implementaciones de control, percepción y comunicación se llevaron a cabo

utilizando las librerías `roboticstoolbox-python`, `NumPy`, `OpenCV`, `ArUco` y módulos de comunicación Bluetooth, todas en el entorno de programación Python [6-8].

Resultados y discusión

Dentro del análisis y desarrollo que se realizó para la construcción del robot se incluye el modelo cinemático, el cual se realizó a partir del esquema estructural del robot (Fig. 1); además se realizó un modelado por computadora para su análisis y simulación lo que permitió la construcción del robot mediante impresión 3D con PLA.

Para el modelo cinemático se propone una configuración de articulaciones de tipo revoluta de forma alineada, sin desviaciones intermedias, lo que simplificó la formulación de este modelo mediante los parámetros de cálculo para su tabla de Denavit-Hartenberg. Con ello se generó un programa que, mediante el control de visión por computadora, con marcadores ArUco, realiza el análisis de cinemática directa e inversa para generación de trayectorias dinámicas; Python. La trayectoria generada mediante el programa de Python se envía mediante comunicación Bluetooth a un microcontrolador ESP32, el cual traduce la información a movimientos rotativos de posición para los motores, y así realizar las trayectorias programadas.

El modelado CAD del robot fue realizado en SolidWorks (Fig. 3), buscando que el diseño físico respetara las dimensiones y configuraciones definidas para el modelo cinemático. La estructura, eslabones, base, soportes y engranajes de transmisión fueron fabricados mediante impresión 3D con PLA. Respecto al diseño de una relación de transmisión mecánica debido a que la resolución de los motores a pasos, para las etapas de articulaciones, no era suficiente para alcanzar las posiciones. Entonces, se determinó que un juego de engranajes con una relación de 3:1 era necesaria para optimizar el control de posición, velocidad y aceleración del robot en sus etapas articuladas.

Gracias a ello, la combinación del robot móvil y articulado alcanzó las posiciones especificadas y su respectiva manipulación de objetos (Fig. 2).

Conclusiones

La implementación del sistema robótico compuesto por una plataforma móvil de tres ruedas y un brazo articulado de tres ejes demostró ser efectiva para realizar tareas de manipulación y desplazamiento controlado con un enfoque en objetos frágiles. La integración de componentes de bajo costo, fabricación mediante impresión 3D y distintas herramientas de software permitió desarrollar una solución funcional, accesible y replicable.

El diseño y modelado mecánico en SolidWorks, junto con el programa de control en Python, permitieron mantener coherencia entre el modelo matemático de control y la construcción física del sistema. El uso de motores a pasos y la transmisión 3:1 adecuada permitieron alcanzar las posiciones de las articulaciones y de las ruedas objetivo.

La comunicación inalámbrica vía Bluetooth y el sistema de visión artificial con marcadores ArUco contribuyeron a una operación fluida, coordinada y adaptable. En conjunto, el sistema validó su funcionamiento en pruebas de navegación y manipulación, cumpliendo con los objetivos planteados y ofreciendo una plataforma robusta para aplicaciones académicas o experimentales en robótica móvil y manipuladora.

Referencias

- [1] S. B. Niku, *Introduction to robotics: analysis, control, applications*. 2011. [Online]. Available: <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB04086836>
- [2] J. J. Craig, *Introduction to Robotics mechanics and Control*. 1986. [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BA68143739>
- [3] M. D'Addario, *Manual de Robotica Industrial: Fundamentos, Usos y Aplicaciones*. Createspace Independent Publishing Platform, 2016.
- [4] R. Siegwart and I. R. Nourbakhsh, *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT Press, 2004.
- [5] C. C. De Wit, B. Siciliano, and G. Bastin, *Theory of robot control*. Springer, 2012.
- [6] J. P. Hernández, "Portafolio de robótica," *Github*. <https://jphajp.github.io/Robotica/> (accessed Apr. 10, 2025).
- [7] S. G. Tzafestas, *Introduction to mobile robot control*. Elsevier, 2013.
- [8] P. Corke, *Robotics, vision and control: Fundamental Algorithms In MATLAB® Second, Completely Revised, Extended And Updated Edition*. Springer, 2017.

Anexo

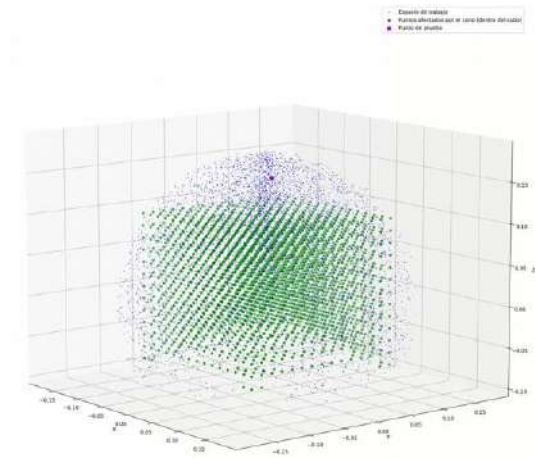


Fig. 1. Espacio de trabajo de robot manipulador dado por semiesfera con puntos azules de dispersión y por puntos verdes para espacio de trabajo lineal.

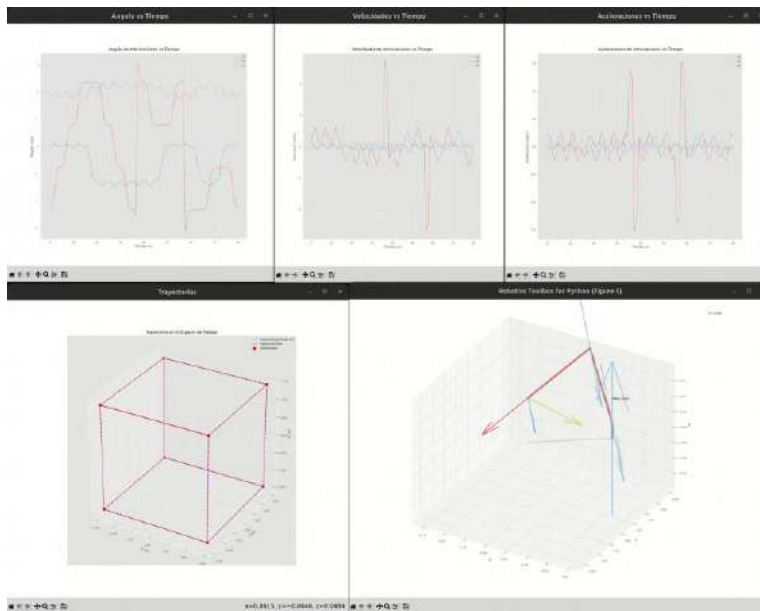


Fig. 2. Análisis de robot mediante programa de control realizado en Python, donde se puede visualizar ángulo, velocidad, aceleración y trayectoria.



Fig. 3. Armado de robot manipulador en SolidWorks para simulaciones e impresión 3D.