



Diseño y construcción de un prototipo de robot colaborativo de 4 grados de libertad con grabado de posiciones para trabajo secuencial aplicado a transporte de piezas mecánicas

Achig Reinoso, Jorge Alexander

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Loza Matovelle, David César MSc.

18 de septiembre del 2023

Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos



Tesis - Cobot [cap 1 - trabajos futuros...

Scan details

Scan time:
August 18th, 2023 at 16:38 UTC

Total Pages:
55

Total Words:
13606

Plagiarism Detection



| Types of plagiarism | | Words |
|---------------------|------|-------|
| Identical | 2% | 267 |
| Minor Changes | 1.3% | 171 |
| Paraphrased | 0.7% | 102 |
| Omitted Words | 0% | 0 |

AI Content Detection



Text coverage
 AI text
 Human text

Nota: Colocar únicamente la página que indica el porcentaje de similitud de la herramienta contratada por la Universidad.



Ing. Loza Matovelle, David César MSc.

Director



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un prototipo de robot colaborativo de 4 grados de libertad con grabado de posiciones para trabajo secuencial aplicado a transporte de piezas mecánicas”** fue realizado por el señor **Achig Reinoso, Jorge Alexander**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de agosto de 2023



Ing. Loza Matovelle, David César MSc.

C.C.: 1708661549



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Achig Reinoso, Jorge Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 1721536801, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño y construcción de un prototipo de robot colaborativo de 4 grados de libertad con grabado de posiciones para trabajo secuencial aplicado a transporte de piezas mecánicas** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 18 de agosto de 2023

Achig Reinoso, Jorge Alexander

C.C.: 1721536801



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo **Achig Reinoso, Jorge Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 1721536801, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Título: Diseño y construcción de un prototipo de robot colaborativo de 4 grados de libertad con grabado de posiciones para trabajo secuencial aplicado a transporte de piezas mecánicas** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 18 de agosto de 2023

Achig Reinoso, Jorge Alexander

C.C.: 1721536801

Dedicatoria

El presente trabajo de titulación está dedicado a mis padres Jorge y Alexandra, cuyo apoyo incondicional ha estado siempre presente sin importar las circunstancias. A mis compañeros y amigos quienes de una u otra manera han formado parte de un camino arduo de sacrificio y aprendizaje.

“El esfuerzo y constancia de hoy impulsarán el éxito del mañana”

Jorge Alexander Achig Reinoso

Agradecimientos

Cordial agradecimiento a mis progenitores, quienes siendo mis primeros maestros me inculcaron valores y responsabilidades, factores fundamentales que hoy en día me permiten culminar mis estudios.

A aquellas personas que me acompañaron en los buenos y malos momentos, donde el panorama parecía incierto, para los que ya no están y los que están por cumplir sus metas, mi más sincero agradecimiento y respeto.

Agradecimientos a todos los docentes por su tiempo brindado, quienes con vocación y paciencia han compartido su conocimiento y experiencia, gracias a mi tutor Ing. David Loza, gracias, Ing. Byron Cortez. Por sus valiosas opiniones y aportes para la culminación de este trabajo.

Jorge Alexander Achig Reinoso

Índice de contenido

| | |
|---|----|
| Resumen | 15 |
| Abstract | 16 |
| Capítulo 1 | 17 |
| Introducción | 17 |
| Antecedentes | 17 |
| Objetivos | 20 |
| Objetivo general..... | 20 |
| Objetivos específicos..... | 21 |
| Justificación en importancia..... | 21 |
| Alcance | 22 |
| Estructura del documento | 23 |
| Capítulo 2 | 25 |
| Estado del arte | 25 |
| Cobots | 25 |
| Características de los cobots..... | 25 |
| Ventajas de trabajar con cobots..... | 26 |
| Legislación de cobots | 27 |
| Parada monitorizada | 28 |
| Controles guiados a mano (HGC) | 28 |
| Monitoreo de velocidad y separación (SSM) | 29 |
| Limitación de potencia y fuerza (PFL) | 30 |
| Retos importantes al usar cobots | 30 |

| | |
|---|----|
| Capítulo 3 | 32 |
| Metodología, diseño, cinemática y dinámica del cobot | 32 |
| Planeación de arquitectura | 32 |
| Desarrollo de concepto | 33 |
| Definición del concepto | 37 |
| Generación de concepto | 37 |
| Componentes mecánicos | 38 |
| Convergencia por método h..... | 44 |
| Componentes eléctricos | 45 |
| Componentes de control y software..... | 50 |
| Criterio de selección de ejes | 52 |
| Cinemática directa | 53 |
| Dinámica del cobot | 55 |
| Resolución de dinámica del cobot | 58 |
| Cálculo de torques | 62 |
| Capítulo 4 | 65 |
| Construcción, funcionamiento y pruebas de rendimiento | 65 |
| Construcción | 65 |
| Ensamblaje | 68 |
| Configuración inicial del equipo..... | 69 |
| Selección y ejecución de secuencia de trabajo | 72 |
| Estructura de formas clave para secuencias de trabajo..... | 75 |
| Grabado de posiciones..... | 76 |

| | |
|---|-----|
| | 10 |
| Pruebas de rendimiento..... | 79 |
| Alcance | 79 |
| Consideraciones previas..... | 79 |
| Precisión de distancia..... | 82 |
| Generalidades | 82 |
| Distancia determinada | 82 |
| Resultados de prueba de precisión de distancia..... | 84 |
| Resultados de precisión para trayectoria P1 hacia P2 | 85 |
| Resultados de precisión para trayectoria P2 hacia P3 | 86 |
| Resultados de precisión para trayectoria P3 hacia P4 | 87 |
| Resultados de precisión para trayectoria P4 hacia P5 | 88 |
| Resultados de prueba de repetibilidad de distancia..... | 89 |
| Resultados de repetibilidad para trayectoria P1 hacia P2..... | 89 |
| Resultados de repetibilidad para trayectoria P2 hacia P3} | 90 |
| Resultados de repetibilidad para trayectoria P3 hacia P4..... | 91 |
| Resultados de repetibilidad para trayectoria P4 hacia P5..... | 92 |
| Capítulo 5 | 96 |
| Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros | 96 |
| Conclusiones | 96 |
| Recomendaciones | 97 |
| Trabajos futuros | 98 |
| Bibliografía | 99 |
| Apéndices..... | 102 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Lista de necesidades e importancia relativa..... | 34 |
| Tabla 2 Tabla ranking Que y Como basado en HOQ..... | 36 |
| Tabla 3 Datos técnicos servomotores | 46 |
| Tabla 4 Datos técnicos microcontrolador | 47 |
| Tabla 5 Datos técnicos fuente de alimentación | 48 |
| Tabla 6 Consumo energético de cobot | 50 |
| Tabla 7 Modelado de cinemática directa..... | 53 |
| Tabla 8 Matriz de inercia y valor de masa de eslabones..... | 59 |
| Tabla 9 Cargas de prueba..... | 80 |
| Tabla 10. Reporte de pruebas..... | 81 |
| Tabla 11 Resultados Pruebas de precisión y repetibilidad de distancia | 84 |
| Tabla 12 Criterio de aceptabilidad para prueba de repetibilidad seis sigma..... | 93 |
| Tabla 13 Porcentaje de repetibilidad para cuatro trayectorias..... | 94 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 Prototipo de cobot unicycle..... | 18 |
| Figura 2 Universal robots UR5 | 19 |
| Figura 3 FANUC CR-35iA..... | 19 |
| Figura 4 Yumi Robot..... | 20 |
| Figura 5 Cobot e interfaz de grabado..... | 23 |
| Figura 6 Ventajas de cobots frente a robots convencionales | 27 |
| Figura 7 Parada monitorizada | 28 |
| Figura 8 Supervisión de separación y velocidad del cobot | 29 |
| Figura 9 Aplicaciones potenciales de cobots | 31 |
| Figura 10 Esquema de caja negra | 32 |
| Figura 11 Esquema de caja abierta | 33 |
| Figura 12 Esquema general del proyecto, componentes..... | 37 |
| Figura 13 Subsistema de soporte..... | 38 |
| Figura 14 Análisis Estático base a) Tensión, b) Factor de seguridad | 39 |
| Figura 15 Análisis Estático soporte brazo a) Tensión, b) Factor de seguridad | 40 |
| Figura 16 Análisis Estático brazo a) Tensión, b) Factor de seguridad..... | 41 |
| Figura 17 Análisis Estático extensión brazo a) Tensión, b) Factor de seguridad | 42 |
| Figura 18 Factor de convergencia cero en extensión de brazo..... | 43 |
| Figura 19 Análisis Estático extensión tenaza a) Tensión, b) Factor de seguridad | 43 |
| Figura 20 Convergencia método h a) Grafica de convergencia, b) corrección de mallado método h | 44 |
| Figura 21 Dimensionamiento servomotores mecanismo ideal | 45 |
| Figura 22 Diagrama del circuito | 49 |
| Figura 23 Diagrama de transmisión de datos | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 24 Diagrama de grabado de posiciones..... | 51 |
| Figura 25 Criterio de selección de ejes | 52 |
| Figura 26 Representación simbólica del cobot con sus centros de masa..... | 58 |
| Figura 27 Grafica de torques. a) Segunda articulación, b) Tercera articulación | 62 |
| Figura 28 Ensamble tapa de circuito..... | 66 |
| Figura 29 Piezas impresas 3D en material PLA | 66 |
| Figura 30 Actuador final modular | 66 |
| Figura 31 Fuente de poder cobot | 67 |
| Figura 32 Dobles de piezas de acero inoxidable | 67 |
| Figura 33 Vista Superior cobot y peso de probeta utilizada | 67 |
| Figura 34 Diagrama de ensamblaje de cobot | 68 |
| Figura 35 Cobot construcción física | 69 |
| Figura 36 Inicio de sistema operativo ROS..... | 69 |
| Figura 37 Inicio de nodo de comunicación | 70 |
| Figura 38 Comunicación serial | 71 |
| Figura 39 Inicio de interfaz de usuario..... | 71 |
| Figura 40 Selección ejecución de secuencia de trabajo..... | 72 |
| Figura 41 Selección de secuencias desde interfaz de usuario a) Mensaje ROS, b) Interfaz | 73 |
| Figura 42 Previsualización de trayectoria guardada | 73 |
| Figura 43 Inicio y control de trayectoria guardada | 74 |
| Figura 44 Estructura de formas clave..... | 75 |
| Figura 45 Interfaz de usuario en modo grabado..... | 76 |
| Figura 46 Campo para ingreso de nombre correspondiente a la nueva secuencia | 76 |
| Figura 47 Grabado manual de posiciones..... | 77 |

| | |
|---|----|
| Figura 48 Información de grabado por pantalla LCD a) Instrucciones, b) Grabado D1, c) Grabado D2, d) Grabado D3, e) Grabado D4. (Fuente propia)..... | 77 |
| Figura 49 Grabado de posiciones a) Interfaz de control, b) cobot..... | 78 |
| Figura 50 Guardado y sincronización de la nueva secuencia de trabajo | 78 |
| Figura 51 Tablero de evaluación | 80 |
| Figura 52 Distancia determinada | 82 |
| Figura 53 Recorrido de posiciones por ciclo | 83 |
| Figura 54 Análisis de probabilidad en trayectoria 1 realizado en Minitab..... | 85 |
| Figura 55 Análisis de probabilidad en trayectoria 2 realizado en Minitab..... | 86 |
| Figura 56 Análisis de probabilidad en trayectoria 3 realizado en Minitab..... | 87 |
| Figura 57 Análisis de probabilidad en trayectoria 1 realizado en Minitab..... | 88 |
| Figura 58 Resultados repetibilidad trayectoria 1 a) Método de Tukey, b) Intervalos de confianza | 89 |
| Figura 59 Resultados repetibilidad trayectoria 2 a) Método de Tukey, b) Intervalos de confianza | 90 |
| Figura 60 Resultados repetibilidad trayectoria 2 a) Método de Tukey, b) Intervalos de confianza | 91 |
| Figura 61 Resultados repetibilidad trayectoria 2 a) Método de Tukey, b) Intervalos de confianza | 92 |

Resumen

Los cobots son un tipo de robots orientados al trabajo colaborativo cuyo origen surge de la necesidad de interacción hombre máquina en procesos de automatización flexible. A diferencia de los robots convencionales estos no requieren de forma obligatoria la instalación de vallas de seguridad o estaciones aisladas, así como programación por líneas de código, con conocimiento previo de cinemática inversa o directa. El objetivo del presente trabajo es entregar un cobot funcional que puede realizar diferentes movimientos de forma práctica y demostrativa, otorgando la posibilidad de ampliar las secuencias preprogramadas, brindando flexibilidad y confianza al usuario en la manipulación directa del equipo.

El incentivo principal que impulsa este proyecto es sentar las bases en la incursión y desarrollo de robots orientados a trabajo colaborativo, para llevar a cabo esto, se desarrolló un prototipo el cual cuenta con 4 grados de libertad, donde los actuadores son controlados y monitoreados en tiempo real con un sistema de comunicación bajo Robot *Operating System* (ROS) y una interfaz de usuario multiplataforma para la previsualización, gestión y grabado de secuencias.

El primer capítulo presenta una descripción general del proyecto, iniciando con los objetivos planteado hasta el alcance logrado. El segundo capítulo detalla el origen, aplicaciones y aportes en trabajos cooperativos desde sus inicios hasta la actualidad. El tercer capítulo aborda la definición de necesidades, planeación de arquitectura, software control y coste de producción. Además, se da a conocer los cálculos efectuados con el prototipo realizado tanto el modelo cinemático y dinámico. El cuarto capítulo presenta los detalles de construcción y funcionamiento, así como resultados obtenidos de la evaluación del equipo bajo la norma ISO 9283, tanto en precisión y repetibilidad de distancia. El quinto y último capítulo finaliza con las conclusiones halladas y recomendaciones, las cuales servirán como guía para trabajos futuros.

Palabras Clave: cobot, trabajo colaborativo, grabado de posiciones, equipo interactivo.

Abstract

Cobots are a type of robots designed for collaborative work, originating from the need for human-machine interaction in flexible automation processes. Unlike conventional robots, they do not require the mandatory installation of safety fences or isolated stations, nor programming through lines of code with prior knowledge of inverse or direct kinematics. The objective of this work is to deliver a functional cobot capable of performing various movements in a practical and demonstrative manner, offering the possibility of expanding pre-programmed sequences, providing flexibility, and instilling confidence in the user for direct manipulation of the equipment.

The main incentive driving this project is to establish the foundations for the involvement and development of robots focused on collaborative work. To achieve this, a prototype was developed, which features 4 degrees of freedom, where the actuators are controlled and monitored in real-time using a communication system based on the Robot Operating System (ROS), along with a multi-platform user interface for previewing, managing, and recording sequences.

The first chapter presents a general overview of the project, starting with the stated objectives and extending to the achieved scope. The second chapter details the origin, applications, and contributions in cooperative work from its beginnings up to the present day. The third chapter addresses the definition of needs, architectural planning, control software, and production cost. Additionally, calculations carried out with the prototype are presented, covering both the kinematic and dynamic model. The fourth chapter presents construction and operation details, as well as the results obtained from evaluating the equipment according to ISO 9283 standards, encompassing precision and distance repeatability. The fifth and final chapter concludes with the findings and recommendations for future work.

Keywords: cobot, collaborative work, recording of positions, interactive team.

Capítulo 1

Introducción

El capítulo 1, justifica el motivo para la realización de un cobot para trabajo colaborativo, realizando un breve recorrido desde el inicio de este tipo de máquinas hasta la actualidad. Adicionalmente se definen los objetivos generales, específicos y el alcance esperado.

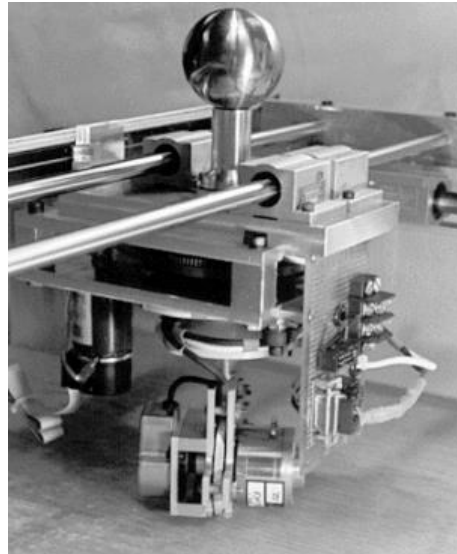
Antecedentes

Los cobots son un tipo de robots orientados al trabajo colaborativo cuyo origen surge de la necesidad de interacción hombre máquina en procesos de automatización flexible. A diferencia de los robots convencionales estos no requieren de forma obligatoria la instalación de vallas de seguridad o estaciones aisladas. Según un informe reciente de *Loup Ventures* y la RIA (*Robotic Industries Association*) el gasto mundial en robótica alcanzará los \$ 13 mil millones en 2025. Actualmente, los robots colaborativos solo representan alrededor del 3% de todas las ventas de robots. Se espera que este número aumente al 34% en 2025 (RIA, 2018).

En 1996 en la Universidad Northwestern los profesores E. J. Edward Colgate y Michael Peshkin crean un aparato y método para la interacción física y directa entre una persona y un dispositivo manipulador. Partiendo como una iniciativa de la compañía General Motors cuya finalidad, implementar la robótica en el sector de la automoción, encontrando una forma de hacer que los robots sean seguros para trabajar junto con personas. Es decir, sin jaulas de seguridad y sin límites de interacción significativos (J. Edward Colgate, 1996).

Figura 1

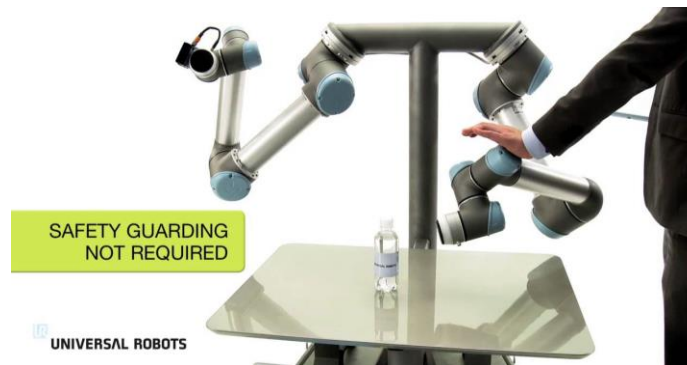
Prototipo de cobot uniciclo



Nota. Tomado de (J. Edward Colgate, 1996)

En 2002 la compañía Cobotic de Stanley, realizó varios cobots orientado al montaje de automóviles. La tecnología fue desarrollada a partir de la investigación financiada por la industria automotriz. Cobotics, de la "robótica colaborativa", consistía en equilibradores servo accionados controlados por computadora que mejoran la productividad en la elevación y manipulación de piezas pesadas en operaciones como líneas de ensamblaje o empaque. También reducen la tensión en el operador (Cranes, 2003).

En 2008, Universal robots una empresa danesa comercializó el modelo UR5 el primer cobot capaz de trabajar en conjunto con humanos, eliminando la necesidad de jaulas de distanciamiento brindando a pequeños y medianos fabricantes la posibilidad de automatizar sus instalaciones sin una remodelación total de sus celdas de producción. Véase Figura 2. (Edwards, 2016).

Figura 2*Universal robots UR5*

Nota. Tomado de (Universal robots, 2022)

En 2008, la compañía FANUC saca al mercado el robot colaborativo CR-35iA, con una capacidad de carga igual a 35 Kg, su aplicación principal fue destinada a la manipulación de objetos de gran peso, con un alcance de 181.3 cm, el equipo contaba con un sistema de sensores integrados, brindando así mayor seguridad en su manipulación, con hardware integrado moderno y más de 250 funciones de software. Diseñado para ser más intuitivo, optimiza la potencia para disminuir el consumo energético, alto rendimiento en tiempos de ciclo con mayor rapidez y precisión (FANUC, s.f).

Figura 3*FANUC CR-35iA*

Nota. Tomado de (FANUC, s.f)

En 2015 la empresa ABB lanza el primer cobot de 2 brazos con el nombre Yumi, con un alcance de 500 mm, una carga útil de 500g y protección IP30, contaba con una velocidad de rotación igual a 180° por segundo. El controlador integrado IRC5 de quinta generación con tecnología de control de movimiento TrueMove y QuickMove™ le proporcionaba precisión, velocidad, duración del ciclo, programabilidad y sincronización con dispositivos externos (ABB, s.f).

Figura 4

Yumi Robot



Nota. Tomado de (ABB, s.f)

Según un informe reciente de Loup Ventures y la RIA (Robotic Industries Association) el gasto mundial en robótica alcanzará los \$ 13 mil millones en 2025. Actualmente, los robots colaborativos solo representan alrededor del 3% de todas las ventas de robots. Se espera que este número aumente al 34% en 2025 (RIA, 2018).

Objetivos

Objetivo general

- Diseñar y construir un prototipo de robot colaborativo de 4 grados de libertad con grabado de posiciones para trabajo secuencial aplicado a transporte de piezas mecánicas.

Objetivos específicos

- Dimensionar y seleccionar motores eléctricos del cobot para cada articulación que proporcionen la potencia suficiente para el desplazamiento libre de cada uno de los 4 grados de libertad.
- Construir el soporte para los motores y el sistema de transmisión mecánica en cada articulación con materiales impresos en 3D y en acero inoxidable, asegurando un estudio de esfuerzos en cada eslabón.
- Diseñar e implementar un control en cada articulación para regular el giro ejercido por cada uno y permitir el desplazamiento de los actuadores para el proceso de grabado de posición.
- Establecer comunicación entre el cobot y el sistema operativo ROS para el envío y recepción de datos bidireccionales que componen su posición y ángulos de giro en cada uno de los cuatro actuadores.
- Desarrollar e implementar una interfaz multiplataforma de visualización en tiempo real por medio de servidor local sufriendo los datos en consola entregados por ROS e incluyendo un panel de administración para control de inicio y paro del cobot.
- Realizar una validación del cobot por medio de la norma ISO 9283 evaluando el desempeño del cobot en tareas de paletizado previamente grabadas y apegadas a las expectativas del comportamiento esperado dentro de un equipo de este tipo.

Justificación en importancia

La inserción de cobots al ámbito industrial genera altas expectativas en cuanto a eficiencia, modernización y mayores prestaciones. Sin embargo, a la hora de considerar una implementación seria de este tipo de equipos surgen preguntas como los elevados costos y la falta de conocimiento que se tiene de estos en cuanto a programación, siendo uno de los puntos de declive más relevantes, por lo tanto, el principal problema es el proceso de programación complicado, basado en cinemática directa, inversa,

sistemas de referencia locales y globales los cuales demandan un conocimiento intermedio – alto acerca de robótica convencional.

En Ecuador el tema referente a cobots se menciona de manera expectante, pero carente de propuestas, debido a la poca información, por lo cual se cataloga en una fase inicial según el medio escrito (El Universo, 2021). La investigación de este tipo de tecnología se ha visto retrasado en comparación a países de la región, la importancia de incursionar en este campo es sentar las bases de estructura, programación y funcionamiento. Siendo una guía para el desarrollo de trabajos futuros orientados a la automatización.

Por lo tanto, la solución planteada es reemplazar los algoritmos que se generan a partir de cálculos, por un grabado sencillo de posiciones en base a ángulos de giro en cada uno de los grados de libertad. Por medio de una interfaz de usuario, se permitirá la fácil visualización, envío de secuencia de trabajo y control del cobot, facilitando de este modo su uso por parte de usuarios cuyo conocimiento en robótica es bajo o medio.

Alcance

El alcance del proyecto consiste en el diseño y construcción de un cobot de 4 grados de libertad, cuyo diseño mecánico consta de estabones de acero inoxidable para una mayor estabilidad y firmeza en cada articulación. Alimentado por 4 servomotores, el equipo tiene libertad de movimiento y adaptabilidad en un rango de 0 a 180 grados en su base para ajustarse al trabajo que el usuario requiera.

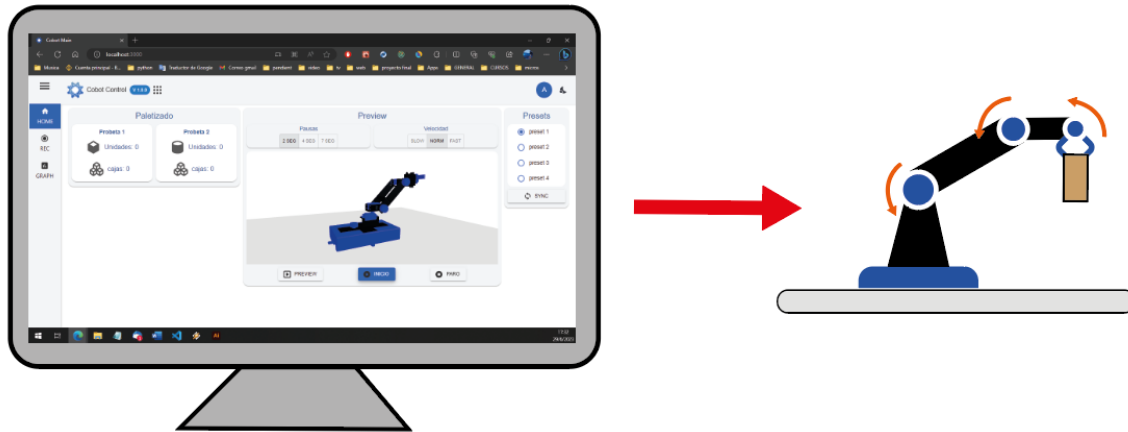
Cuenta con perillas de grabado, para el movimiento de sus articulaciones en tiempo real, brindando la capacidad de definir el ángulo de giro en cada motor y la posición de su actuador final (tenaza) para la sujeción de probetas de hasta 25 mm de espesor de geometría variable.

Adicionalmente, el cobot cuenta con una interfaz de monitoreo y control, para guiar el grabado de posiciones y ejecutar secuencias de trabajo, incorpora 3 modos de espera y ejecución configurables para controlar el tiempo de pausa entra cada movimiento y la velocidad con la cual se moverá el cobot. El

usuario es capaz de previsualizar, pausar, reiniciar o detener cualquier acción en todo momento gracias a sus controles incorporados. Véase Figura 5.

Figura 5

Cobot e interfaz de grabado



Estructura del documento

El proyecto consta de 5 capítulos, donde se presenta toda la información de manera detallada respecto a la planificación, diseño, construcción, evaluación y desempeño del cobot orientado a una aplicación de transporte de probetas de dos tipos.

El primer capítulo muestra una descripción general del proyecto, los antecedentes y trabajos previos realizados, además de tratar los objetivos planteado, justifica su importancia y define su alcance.

El segundo capítulo detalla el estado del arte, características de los cobots, así como sus ventajas y legislación vigente, finalmente aborda los retos importantes al usar cobots.

El tercer capítulo aborda la definición de necesidades, planeación de arquitectura, de los cuales nacen los conceptos de manufactura, software control y coste de producción. Además, da a conocer los cálculos efectuados con el prototipo realizado tanto el modelo cinemático y dinámico.

El cuarto capítulo presenta los detalles construcción y funcionamiento del equipo, Así como los resultados obtenidos de la evaluación del equipo bajo la norma ISO 9283, tanto en precisión y repetibilidad de distancia.

El quinto y último capítulo finaliza con las conclusiones halladas y recomendaciones planteadas, las cuales servirán como guía para trabajos futuros.

Capítulo 2

Estado del arte

Cobots

El término cobot nace de la mezcla de dos conceptos “Colaboración” y “Robot”, su principal diferencia con los robots radica en la capacidad de desempeñar tareas e interactuar con personas en actividades o sesiones de trabajo, sin limitarse a actividades industriales sino en tareas de uso diario como asistentes o complementos de trabajo. Esta interacción permite al usuario desempeñar tareas de mayor complejidad mientras que el cobot se encarga de las tareas repetitivas, permitiendo automatizar procesos con mayor eficacia que con robots convencionales, según el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) se estima que solo el 10% de los trabajos son totalmente automatizables, mientras que la colaboración entre cobots y operadores muestran un 85% de eficacia en procesos de diversa índole.

Características de los cobots

En comparación con los robots tradicionales, los cobots evaluados por (FAIM, 2019) mejoran en cuanto a su facilidad de uso (desde la perspectiva del trabajador humano en la celda del robot) y su flexibilidad frente a las alteraciones de la producción. Las principales características que presentan los cobots son:

- **Adaptabilidad:** Posibilidad de variar su forma de trabajo en base a las necesidades de usuario y a las condiciones que el trabajo demanda.
- **Tiempos cortos de ejecución:** Gracias a su capacidad de ejecutar movimientos precisos en tramos cortos de tiempo, las acciones secuenciales en una cadena de producción o proceso demoran menos.
- **Menor carga laboral:** Las actividades que antes eran realizadas por una persona, son complementadas o remplazadas por un cobot, brindando libertad al operador y salvaguardado su

integridad física en tareas que involucran el manejo de materiales o elementos peligrosos o cortantes.

Ventajas de trabajar con cobots

Los cobots son robots colaborativos desarrollados con el objetivo final de ser medios de fabricación compactos, con altas capacidades de movilidad, sencillos en su programación, inteligentes, capaces de interactuar con los humanos sin poner en riesgo su integridad gracias a sus características de seguridad incorporadas y con un retorno de su inversión más rápida.

Si pensamos en la necesidad de reducir costes, mejorar el rendimiento de nuestras plantas productivas, optimizar líneas de producción, potenciar la calidad de nuestros productos o incrementar nuestros ingresos, no es sorprendente encontrarse este tipo de robots colaborativos en amplios sectores industriales.

Por otro lado, los robots convencionales, debido a su trabajo intensivo, en ocasiones pueden presentar peligros para la seguridad del operario. Es por ello, que no pueden ubicarse en lugares donde no se dispongan de barreras de seguridad que protejan a las personas. La carencia de sensores de fuerza (que da la capacidad al robot de conocer su entorno y que le permite pararse automáticamente en el caso de que detecte un intruso en su espacio de trabajo), esto sumado a su excesivo peso y volumen, convierte a los robots industriales en soluciones potencialmente peligrosas, además este tipo de los robots suelen ser en la mayoría de los casos máquinas mucho más complejas que requieren la intervención de un experto tanto en su programación como en su manejo (Inovativa Intergración, 2022). Véase figura 6.

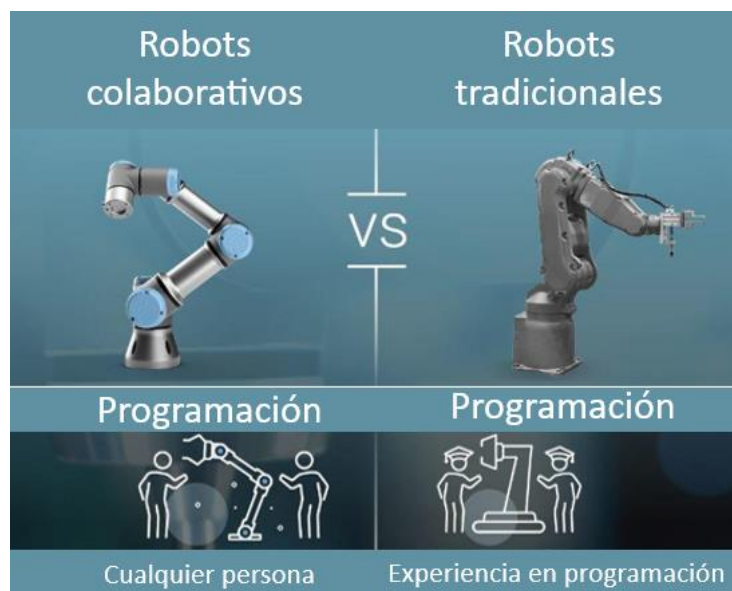
De lo anteriormente expuesto se puede identificar ventajas considerables que sitúan a los cobots como una opción viable en el ámbito colaborativo.

- Programación de movimientos con conocimiento previo.
- Noción de posición en tiempo real.

- Reducción de choques al programar posiciones indebidas.
- Flexibilidad en operaciones y movimientos.
- Mayor control y precisión en grabado de posiciones.
- Mejor planeamiento de trayectorias.
- Tiempo de programación reducido.

Figura 6

Ventajas de cobots frente a robots convencionales



Nota. Tomado de (Universal Robots, 2017)

Legislación de cobots

Según la norma ISO 15006 la legislación respecto a los robots colaborativos o cobots está orientada para equipos programables, capaces de trabajar con personas en un mismo espacio de trabajo sin peligro de causar lesiones o interferencias desfavorables para el personal ni el proceso, siendo este tipo de operaciones un margen importante a considerar para precautelar la integridad de las personas, el medio de control se lo realiza considerando los parámetros del proceso en cuando a velocidad y fuerza efectuada por el equipo que puede ser mecánico eléctrico, mecánico neumático o híbrido.

El estándar de referencia para aplicaciones colaborativas mencionado en (GT Engineering, 2023) lista cuatro funciones importantes que un robot debe tener para ser adecuado para aplicaciones colaborativas:

1. Parada monitorizada.
2. Controles guiados a mano (HGC).
3. Monitoreo de velocidad y separación (SSM).
4. Limitación de potencia y fuerza (PFL).

Parada monitorizada

Requiere un software o dispositivo para pausar la función del robot cuando el trabajador se acerca al robot para evitar movimientos peligrosos. La función, en la nueva edición de ISO 10218-1 se llamará "*monitored-standstill*". Véase figura 7.

Figura 7

Parada monitorizada



Controles guiados a mano (HGC)

Consiste en permitir que el operador mueva el robot mediante un dispositivo manual para transmitir comandos de movimiento. El sistema del cobot debe tener lo siguiente:

- función de seguridad de velocidad monitoreada.
- parada de protección de categoría 2 (IEC 60204-1).
- función de seguridad de parada monitoreada.

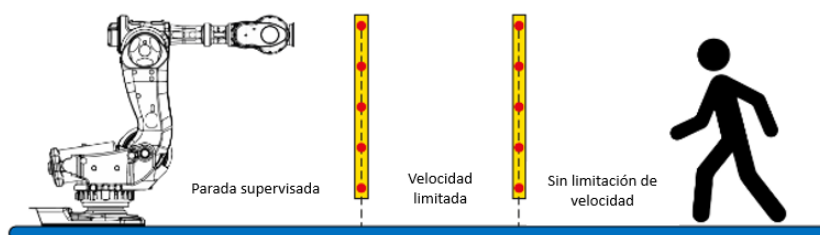
Es necesario realizar una evaluación de riesgos para determinar el valor límite de velocidad supervisado.

Monitoreo de velocidad y separación (SSM)

Las aplicaciones colaborativas que utilizan SSM pueden utilizar un SPE que detecta la entrada en un espacio protegido o que supervisa la presencia de cualquier persona. Cuando se utilice un dispositivo de detección de presencia, como un escáner láser o un radar de seguridad, para definir las zonas de detección, el tamaño y la ubicación de las zonas de detección se establecerán de manera que se mantenga la distancia de separación, incluso durante las transiciones de la zona de detección. Tenga en cuenta que se debe considerar el tiempo para que la aplicación del robot desacelere (GT Engineering, 2023). Véase figura 8.

Figura 8

Supervisión de separación y velocidad del cobot



Nota. Tomado de (GT Engineering, 2023)

El SSM puede ser proporcionado por el controlador del robot o por un dispositivo de protección externo, o por una mezcla de ambos.

Limitación de potencia y fuerza (PFL)

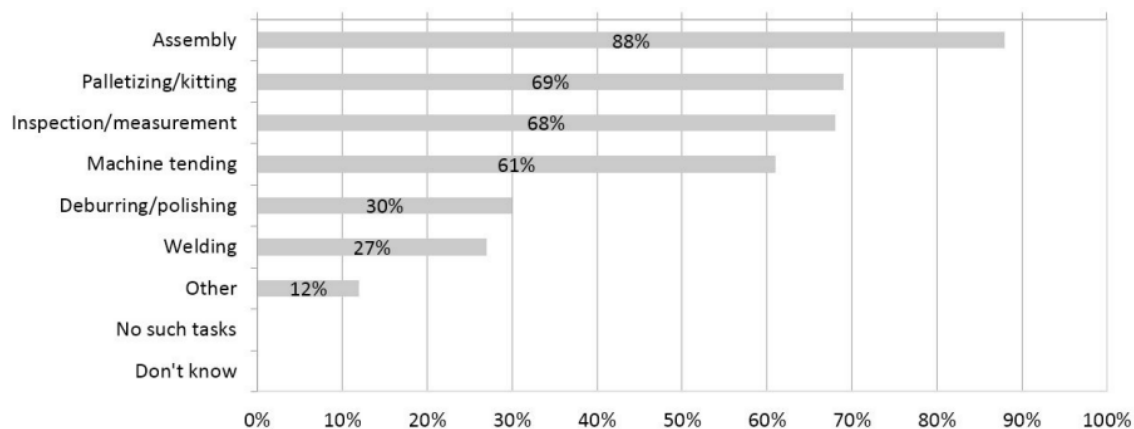
En cuarto método permite el contacto entre el operador y un robot, pero el requisito es el control del impulso del robot para evitar lesiones y dolor. El logro de las funciones PFL puede ser mediante un diseño de seguridad inherentemente que puede ser fijo, no ajustable o configurable, o mediante funciones de seguridad que se pueden ajustar o configurar. En el caso de los robots con funciones de seguridad PFL ajustables o configurables, superar cualquier límite de parámetros provocará una "parada de protección" (GT Engeneering, 2023).

Retos importantes al usar cobots

Los retos por superar en el diseño y funcionalidad de los cobots son la seguridad y facilidad de manejo. Según la edición número 29 de la Conferencia internacional de Manufactura inteligente y automatización flexible (FAIM, 2019) encuestados finlandeses, representantes de sectores integradores, industriales y académicos concluyen que la inserción de cobot en el ámbito laboral y educativo es posible siempre y cuando se trabaje en las necesidades de desarrollo, integrando nuevas formas de asignación de trabajo y mejorando los términos de seguridad para precautelar la integridad de las personas que interactúen con este tipo de robots colaborativos. Dentro de las aplicaciones potenciales expuestas por los expertos encuestados se encuentran: ensamblaje con un 88%, paletizado con 69%, inspección y mediciones con un 68% las cuales se resumen en la figura 9.

Figura 9

Aplicaciones potenciales de cobots



Nota. Tomado de (FAIM, 2019)

Resumen

El Capítulo 2 proporciona una descripción de los cobots, así como las bases en las cuales se fundamenta el concepto. Se explica su diferencia con la robótica convencional y se detallan sus principales características y capacidad de adaptación a diversos entornos de trabajo.

Además, se aborda la legislación relacionada con los cobots, específicamente la norma ISO 15006. Esta norma identifica los parámetros y consideraciones clave que deben tenerse en cuenta al implementar este tipo de equipos en el ámbito industrial y en actividades colaborativas con personas. Se destacan 4 puntos importantes enfocados en la facilidad de uso y el cuidado integral de las personas con las cuales se interactúa.

Finalmente, se exponen las ventajas significativas del uso de cobots en comparación con robots convencionales y se mencionan los retos importantes que aún deben superarse en el diseño y funcionalidad de este tipo de equipos, en el contexto de la Manufactura inteligente y la automatización flexible, según lo indicado por (FAIM, 2019).

Capítulo 3

Metodología, diseño, cinemática y dinámica del cobot

El capítulo 3 aborda el diseño y construcción del prototipo de cobot, usando la metodología de Karl T. Ulrich (Ulrich, 2012), definiendo las necesidades y evaluando las posibles soluciones, se desarrollarán cinco fases, desde la planeación hasta el diseño final utilizando los componentes seleccionados para dicho proyecto.

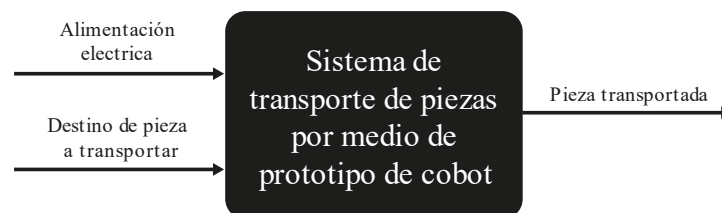
Se obtiene el modelo cinemático y dinámico del prototipo de cobot de cuatro grados de libertad, pasando por un estudio de cinemática inversa se determina la posición del actuador final en base a los grados de giro por parte de cada motor

Planeación de arquitectura

En esta etapa haciendo uso del esquema de caja negra, se presenta de forma generalizada los componentes que constituyen el sistema, en la entrada se listan los elementos y requerimientos para realizar un proceso o servicio y en la salida se listan el o los objetivos logrados. En la figura 10, se presenta el sistema propuesto.

Figura 10

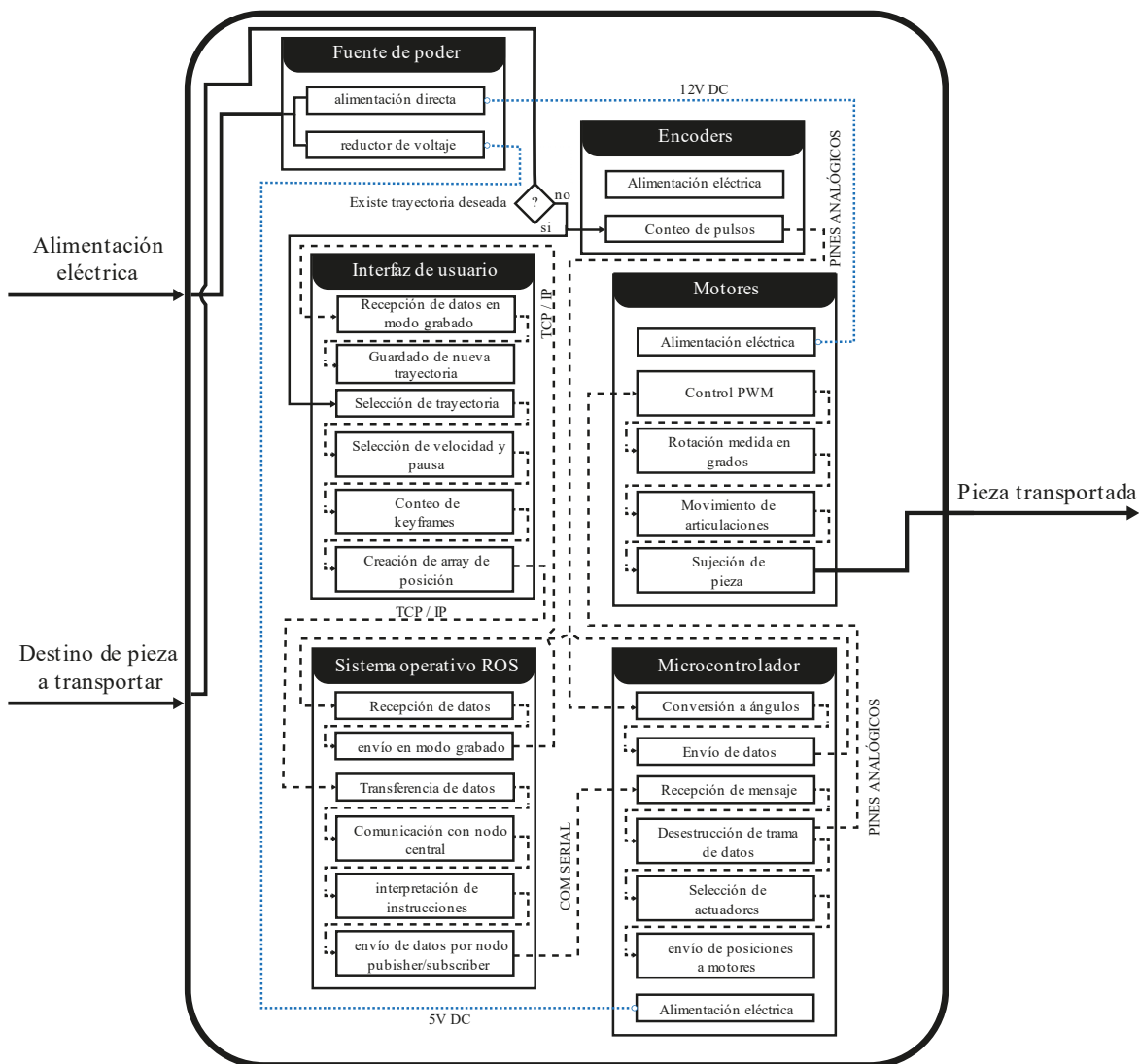
Esquema de caja negra



A continuación, se describen los elementos que componen la arquitectura del sistema y su interacción directa e indirecta, dependiente de la existencia o ausencia de la trayectoria deseada, en la figura 11, se amplían detalles.

Figura 11

Esquema de caja abierta



Desarrollo de concepto

En cada proyecto es vital identificar las necesidades del cliente para el desarrollo del producto, es así que en base a (Ulrich, 2012) se toma como la HoQ (House of Quality) que pertenece al procedimiento de despliegue de la función de calidad, donde se listan los posibles elementos a considerar para satisfacer los requerimientos y expectativas del producto en mención, un aves conocidos los requerimientos del cliente, se interpreta estos datos y se planifica posibles soluciones con criterio técnico. Es necesario partir desde requerimientos generalizados y luego ir profundizando en cada uno de ellos, es así como en la tabla

1 se listan las necesidades identificadas y su importancia calificadas de 1 a 5, para el desarrollo del prototipo de cobot.

Tabla 1

Lista de necesidades e importancia relativa

| Número | Concepto | Requerimiento | Importancia |
|---------------|---------------------|---|--------------------|
| 1 | Manufactura | Estructura estable | 5 |
| | | Materiales resistentes a condiciones extremas | 3 |
| | | Sistema fácil de transportar | 3 |
| | | Equipo de fácil desarmado | 3 |
| | | Material plástico | 1 |
| 2 | Desempeño | Altas velocidades de funcionamiento | 3 |
| | | Capacidad alta de carga | 2 |
| | | Tiempos prolongados de trabajo | 2 |
| | | Precisión en posicionamiento de efector final | 4 |
| | | Capacidad de adaptabilidad a diversos medios | 5 |
| 3 | Seguridad | Paros de emergencia | 5 |
| | | Control de velocidad | 4 |
| 4 | Interfaz de Usuario | Fácil manejo | 5 |
| | | Multiplataforma | 2 |
| | | Información fácil de interpretar | 5 |
| | | Estéticamente agradable | 4 |
| 5 | Costos | Bajo costo | 5 |

Teniendo claro los conceptos, su nivel de importancia y una vez identificados, se plantea las posibles soluciones para cada uno de ellos, elaborando una tabla de ranking, se evalúan las opciones más idóneas para logra un producto satisfactorio, se pueden manejar dos posibles escenarios, donde, la interacción entre bloques es factible contribuyendo a una mejor selección de componentes y recursos, el segundo escenario plantea que los bloques demandan de soluciones distintas, por esta razón se hace necesaria la creación de una matriz morfológica planteando un sistema de calificación absoluta y relativa para llegar a una solución acertada compuesta de recursos y elementos con mayor puntuación para cubrir las demandas del cliente. Véase tabla 2.

Los resultados hallados, demuestran una interacción significativa en los campos de manufactura, desempeño y seguridad, permitiendo elegir una arquitectura robusta y segura al mismo tiempo entre materiales de construcción mixta. Mientras tanto, para el apartado de la interfaz se ha identificado una relación directa respecto a las prestaciones demandas y el costo involucrado, dejando claro que el camino con mayor índice de rentabilidad y prestaciones es una interfaz adaptable a diversos dispositivos, con capacidad de brindar información clara y de fácil uso para el usuario, a continuación se resumen las alternativas consideradas para la creación del prototipo de cobot considerando los resultados de la matriz de ranking de la guía HoQ (House of Quality).

- Manufactura: Construcción mixta (eslabones de acero inoxidable y tenaza plástica de material PLA).
- Desempeño: Actuadores tipo servomotor RoHS, con control de velocidad configurable por software.
- Seguridad: Control mixto para detención manual y por software, además de grabado preciso por medio de encoders absolutos.

- Interfaz de usuario: Programado bajo lenguaje JavaScript, adecuado para interacción con lenguajes de programación Python y sistemas operativos basados en Linux bajo la distribución de Ubuntu.
- Costos: Fabricación y uso de materiales mixtos disponibles en el país.

Tabla 2

Tabla ranking Que y Como basado en HOQ

| | | Cómo? | Manufactura | | | | Desempeño | | | Seguridad | | | Interfaz de usuario | | | Costos | |
|--|---------------------|---|-------------|--------------|------------------|--------------------|---------------|----------------------|-------------------|----------------|----------------------|---------------|---------------------|------------------------|------------------|--------------------|------------------------|
| | | | Importancia | Plástico PLA | Acero Inoxidable | Construcción mixta | Motor a pasos | Servomotores Mg 996r | Servomotores RoHS | Control Manual | Control por interfaz | Control Mixto | HMI - PLC | Dashboard - Javascript | Tkinter - Python | Construcción mixta | Componentes importados |
| 1. REQUERIMIENTOS DE LOS CLIENTES | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | Estructura estable | 5 | 7 | 9 | 9 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | Materiales resistentes a condiciones extremas | 3 | 3 | 9 | 8 | | | | | | | | | | | |
| 3 | | Sistema fácil de transportar | 3 | 7 | 9 | 8 | | | | | | | | | | | |
| 4 | | Equipo de fácil desarmado | 3 | 9 | 7 | 8 | | | | | | | | | | | |
| 5 | | Material plástico | 1 | 9 | 0 | 7 | | | | | | | | | | | |
| 6 | | Altas velocidades de funcionamiento | 3 | | | | 6 | 9 | 9 | | | | | | | | |
| 7 | | Capacidad alta de carga | 2 | | | | 7 | 5 | 9 | | | | | | | | |
| 8 | | Tiempos prolongados de trabajo | 2 | | | | 9 | 9 | 9 | | | | | | | | |
| 9 | | Precisión en posicionamiento de efector | 4 | | | | 9 | 7 | 9 | | | | | | | | |
| 10 | | Capacidad de adaptabilidad a diversos medios | 5 | | | | 8 | 7 | 8 | | | | | | | | |
| 11 | | Paros de emergencia | 5 | | | | | | | 9 | 8 | 9 | | | | | |
| 12 | | Control de velocidad | 4 | | | | | | | 6 | 9 | 9 | | | | | |
| 13 | | Fácil manejo | 5 | | | | | | | | | | 3 | 9 | 6 | | |
| 14 | | Multiplataforma | 2 | | | | | | | | | | 0 | 9 | 7 | | |
| 15 | | Información fácil de interpretar | 5 | | | | | | | | | | 5 | 9 | 8 | | |
| 16 | | Estéticamente agradable | 4 | | | | | | | | | | | | | 9 | 7 |
| 17 | | Bajo costo | 5 | | | | | | | | | | | | | 7 | 3 |
| EVALUACION DE IMPORTANCIA | ABSOLUTA | | 101 | 120 | 124 | 126 | 118 | 139 | 69 | 76 | 81 | 40 | 108 | 84 | 71 | 43 | |
| | RELATIVA (%) | | 17 | 21 | 21 | 22 | 20 | 24 | 12 | 13 | 14 | 7 | 19 | 14 | 12 | 7 | |

Definición del concepto

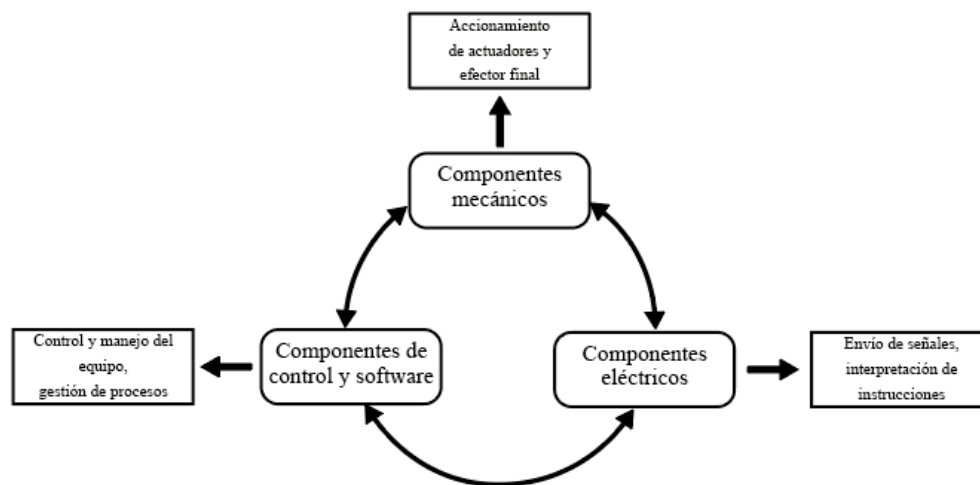
El presente trabajo de diseño y construcción se basa en la guía (Ulrich, 2012), que conceptualiza el diseño para productos, basándose en los requerimientos a cumplir. Se procede a una primera etapa conceptual, donde se definen subsistemas con determinadas funciones a cumplir desarrollándolas de forma específica en la fase de diseño.

Generación de concepto

Partiendo de las necesidades del cliente tratadas en el punto 3.2, llegamos al proceso de generación de concepto que permiten especificar objetivos en la creación del prototipo de cobot, estos permitirán definir componentes y subsistemas desde su conceptualización hasta su creación que trabajan de manera individual y se complementan para el desempeño integral del prototipo que se desea desarrollar.

Figura 12

Esquema general del proyecto, componentes



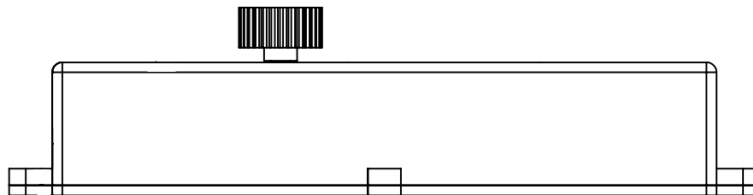
En la figura 12, se puede observar un esquema de los componentes principales que conforman el prototipo de cobot, así como la descripción de cada uno.

Componentes mecánicos

Subsistema de soporte. Subsistema de construcción plástica, acoplada a la base del motor cuya función es asegurar la base de manera firme en al motor principal, para acoplar a estos un sistema de transmisión. Su segunda función es servir como tapa para el cableado general de cada uno los elementos eléctricos conectados a la placa base, resguardada en la base del prototipo. Véase figura 13.

Figura 13

Subsistema de soporte



Subsistema de soporte base. Subsistema de construcción metálica, acoplada al subsistema de soporte cuya función es sostener a la base giratoria denominada base del prototipo de cobot. Véase Figura 14.

Análisis de Esfuerzos y deformación: Los eslabones deben pandear al mínimo posible por tanto para su diseño se considerarán como fuerzas aplicadas en los extremos de cada eslabón y en caso de la base en su eje central, los pesos acumulados de los servomotores por la gravedad siguiendo el principio físico de Fuerzas es igual a masa por aceleración.

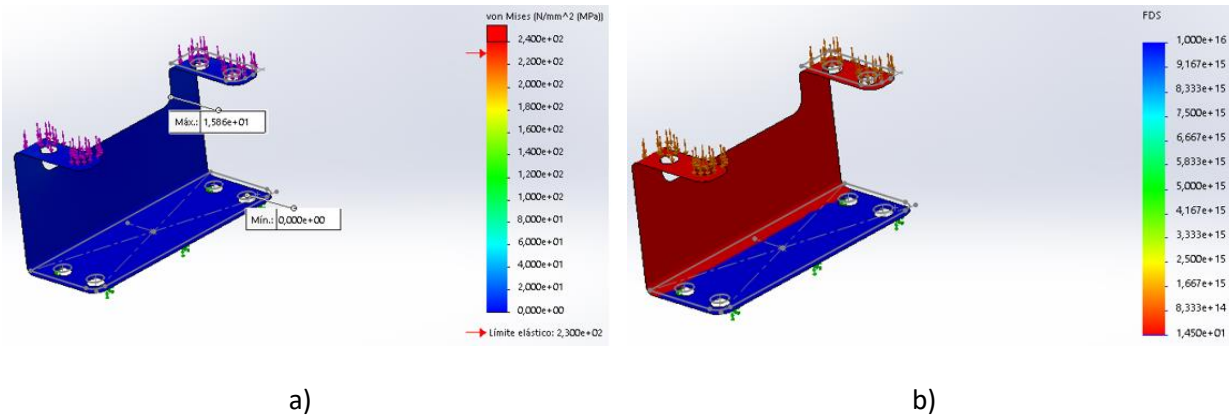
$$F = \sum m \cdot a$$

$$F = (\text{eslabón 1 [kg]} + \text{servomotor 1[kg]} + \text{eslabón 2 [kg]} + \text{servomotor 2[kg]} + \text{eslabón 3 [kg]} \\ + \text{servomotor 3[kg]} + \text{masa tenaza} + \text{servomotor 4 [kg]} + \text{masa probeta[kg]}) \\ \cdot \text{gravedad} \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$F = 5.73 \text{ N}$$

Figura 14

Análisis Estático base a) Tensión, b) Factor de seguridad



Para una fuerza de 5.73 [N] se obtiene un esfuerzo máximo de 15,86 [MPa], inferior a su límite elástico de 2.30 [MPa], garantizando la eficiencia del diseño y soporte de cargas acumuladas de los demás componentes mecánicos con las fuerzas aplicadas en sus centros de concentración. El factor de seguridad hallado se obtiene dividiendo el valor de su límite elástico para el máximo hallado en el estudio de tensión, obteniendo un valor factor de seguridad FS = 14.50.

Para los subsistemas posteriores se aplica el mismo concepto de análisis de esfuerzos y se halla el factor de seguridad correspondiente.

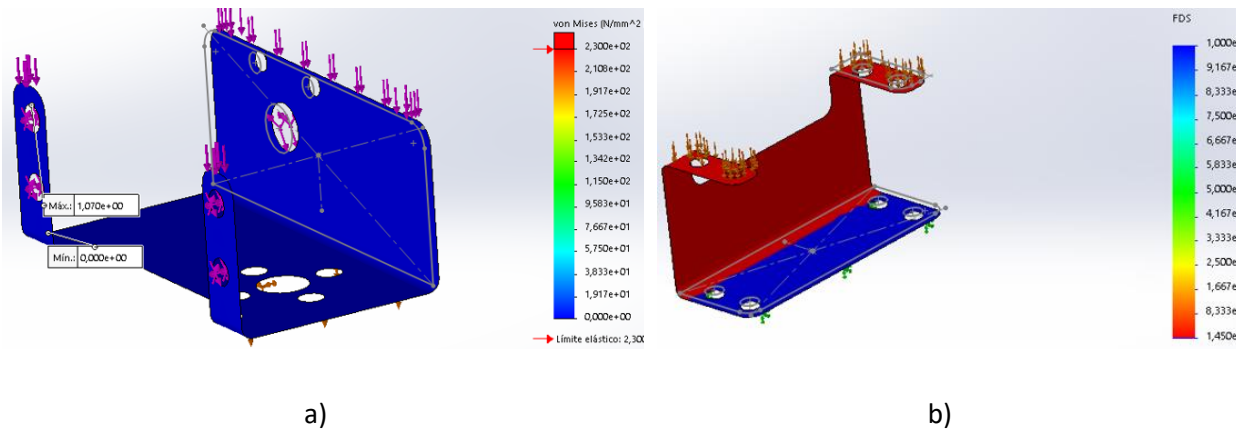
Subsistema de soporte brazo. Subsistema de construcción metálica, acoplada al subsistema de base cuya función es sostener el brazo y actuador final (tenaza) del prototipo de cobot. Véase Figura 15.

Análisis de Esfuerzos y deformación

$$F = 3.44 \text{ N}$$

Figura 15

Análisis Estático soporte brazo a) Tensión, b) Factor de seguridad



Para una fuerza de 3.44 [N] se obtiene un esfuerzo máximo de 1.07 [MPa], inferior a su límite elástico de 2.30 [MPa], garantizando la eficiencia del diseño y soporte de cargas acumuladas de los demás componentes mecánicos con las fuerzas aplicadas en sus centros de concentración. El factor de seguridad hallado se obtiene dividiendo el valor de su límite elástico para el máximo hallado en el estudio de tensión, obteniendo un valor factor de seguridad FS = 214.95.

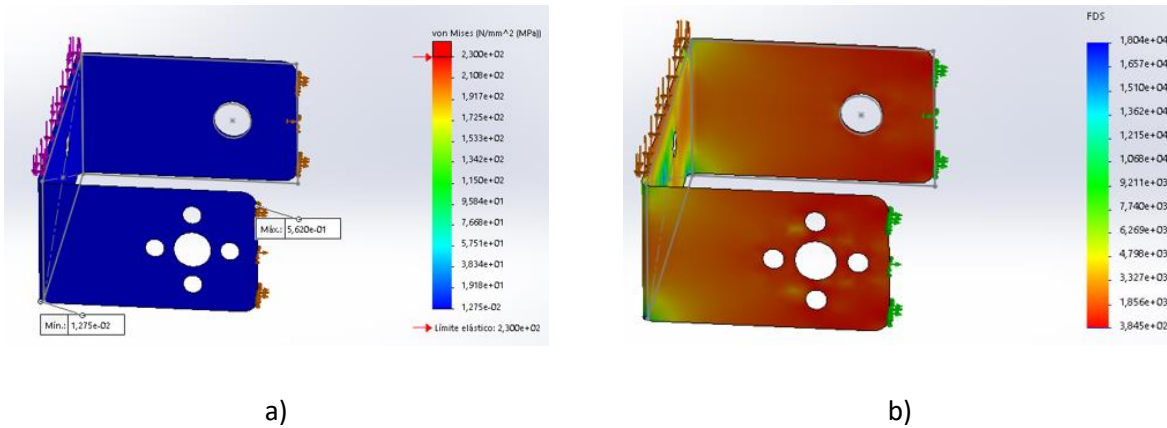
Subsistema brazo. Subsistema de construcción metálica, acoplada al subsistema de base cuya función es sostener el brazo y actuador final (tenaza) del prototipo de cobot. Véase Figura 16.

Análisis de Esfuerzos y deformación

$$F = 2.88 \text{ N}$$

Figura 16

Análisis Estático brazo a) Tensión, b) Factor de seguridad



Para una fuerza de 2.88 [N] se obtiene un esfuerzo máximo de 0.562 [MPa], inferior a su límite elástico de 2.30 [MPa], garantizando la eficiencia del diseño y soporte de cargas acumuladas de los demás componentes mecánicos con las fuerzas aplicadas en sus centros de concentración. El factor de seguridad hallado se obtiene dividiendo el valor de su límite elástico para el máximo hallado en el estudio de tensión, obteniendo un valor factor de seguridad $FS = 409.98$.

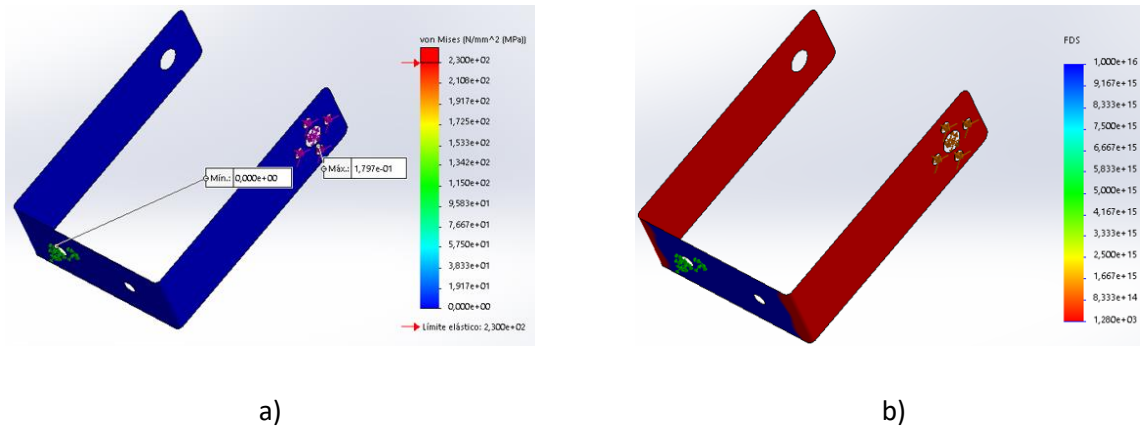
Subsistema de extensión de brazo. Subsistema de construcción metálica, acoplada al subsistema de base cuya función es sostener el actuador final (tenaza) del prototipo de cobot. Véase Figura 17.

Análisis de Esfuerzos y deformación

$$F = 1.96 \text{ N}$$

Figura 17

Análisis Estático extensión brazo a) Tensión, b) Factor de seguridad

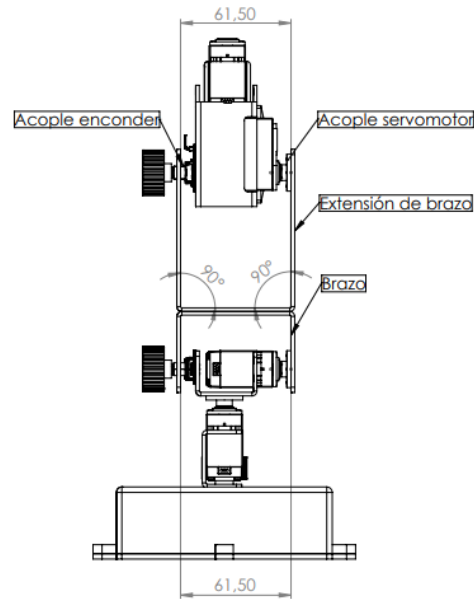


Para una fuerza de 1.96 [N] se obtiene un esfuerzo máximo de 0.179 [MPa], inferior a su límite elástico de 2.30 [MPa], garantizando la eficiencia del diseño y soporte de cargas acumuladas de los demás componentes mecánicos con las fuerzas aplicadas en sus centros de concentración. El factor de seguridad hallado se obtiene dividiendo el valor de su límite elástico para el máximo hallado en el estudio de tensión, obteniendo un valor factor de seguridad $FS = 1279.91$.

El factor de convergencia en este eslabón es cero, debido a que la conexión con el eslabón que actúa como soporte para la tenaza tiene las mismas dimensiones que su predecesor, el soporte del brazo, como se puede observar en la figura 18, ambas caras de la articulación de extensión son paralelas, minimizando de este modo las restricciones de movimiento debido a convergencias positivas o negativas.

Figura 18

Factor de convergencia cero en extensión de brazo



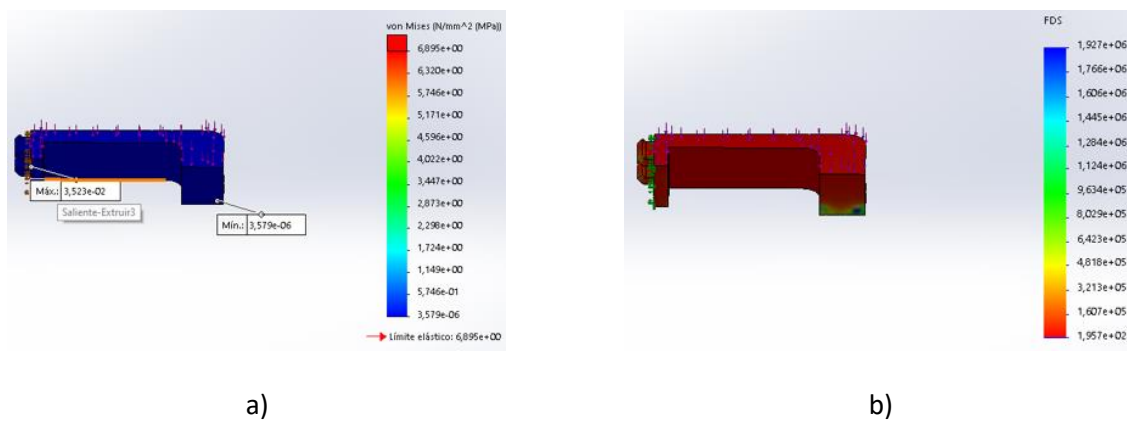
Subsistema de agarre. Subsistema de construcción plástica, acoplada al subsistema de base cuya función es sostener la probeta de máximo 20 gramos. Véase Figura 19.

Análisis de Esfuerzos y deformación

$$F = 0.196 \text{ N}$$

Figura 19

Análisis Estático extensión tenaza a) Tensión, b) Factor de seguridad



Para una fuerza de 0.196 [N] se obtiene un esfuerzo máximo de $3.57 \cdot 10^{-6}$ [MPa], inferior a su límite elástico de 6.8947 [MPa], garantizando la eficiencia del diseño para ambos lados de la tenaza (izquierda y derecha). El factor de seguridad hallado se obtiene dividiendo el valor de su límite elástico para el máximo hallado en el estudio de tensión, obteniendo un valor factor de seguridad FS = 192.99.

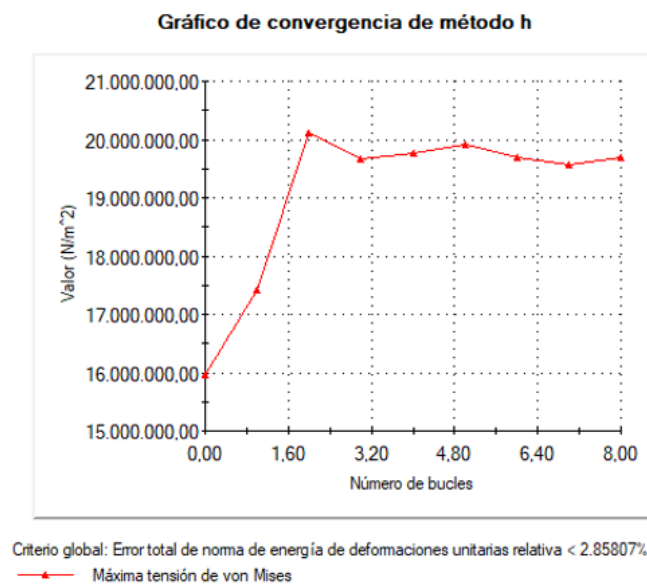
Convergencia por método h

El método de convergencia h, es parte de la solución adaptativa disponible en el software SolidWorks, para definir el nivel de mallado óptimo para simular esfuerzos reales en el elemento mecánico que se está analizando, para fines prácticos se realizó la solución adaptativa para el eslabón número 2, el cual soporta la mayor concentración de esfuerzos cuando el cobot se encuentra en posición horizontal.

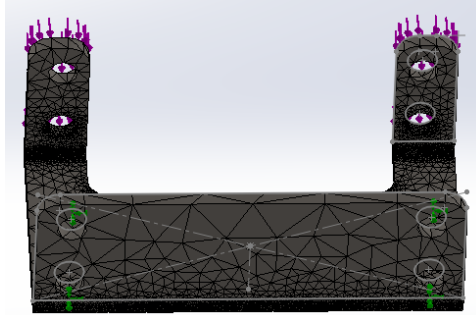
La figura 20 muestra la convergencia para 8 bucles generados donde encontramos una estabilización de esfuerzos definiendo una corrección en el mallado para reducir recursos computacionales en un estudio estático.

Figura 20

Convergencia método h a) Gráfica de convergencia, b) corrección de mallado



a)



b)

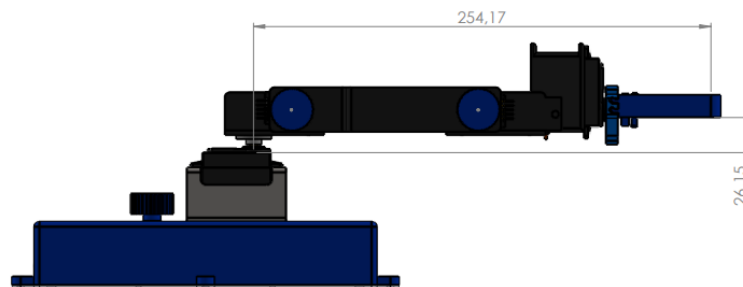
Componentes eléctricos

Servomotores. Convertir la energía eléctrica suministrada en energía mecánica con la suficiente potencia para mover cada una de las 4 articulaciones con el torque necesario para realizar los cambios de posición programados por el usuario.

Para el dimensionamiento posicionaremos el prototipo de cobot en posición horizontal, con el punto más lejano es decir el punto $P(x; y; z) = (254.17 \text{ mm}; 0 \text{ mm}; 26.15 \text{ mm})$ como se observa en la figura 21, la distancia aproximada desde el efector final hacia el eje de giro del servomotor 1 es de 254.17 mm.

Figura 21

Dimensionamiento servomotores mecanismo ideal




Para el eslabón del hombro ubicado a una distancia $l_b = 21.88 \text{ mm}$, se considera una masa de 42,62 gramos, para el eslabón del brazo ubicado a una distancia $l_c = 109 \text{ mm}$, se considera una masa de 48,19 gramos, para el eslabón del antebrazo ubicado a una distancia $l_d = 66.58 \text{ mm}$, se considera una masa de 93,43 gramos, para el eslabón del efector final (tenaza) ubicado a una distancia $l_e = 56.71 \text{ mm}$, se considera

una masa de 54.59 gramos incluida la masa de 20 gramos de la probeta con la cual se realizarán las pruebas de funcionamiento.

El torque requerido de 6.58 [kg/cm] que más se aproxima a los disponibles en el mercado es un servomotor SPT5435LV-180/180 Degrees/35kg/Remote Control, el cual será usado para los eslabones y en el caso del actuador final se decidió usar un servomotor TOWER PRO MG996 9.4 KG 180 GRADOS para aplicaciones futura que demanden mayor toque y levantar pesos considerables en aplicaciones robustas.

Tabla 3

Datos técnicos servomotores

| Parámetros | TOWER PRO SPT5435LV 35KG 180 GRADOS | TOWER PRO MG996 13KG 180 GRADOS |
|---------------------------|--|---|
| Peso | 71 [g] | 55 [g] |
| Dimensiones | 40.5 x 20 x 40.5 [mm] | 40.7 x 19.7 x 42.9 [mm] |
| Torque | 29 [Kgf/cm] a 4.8 [V] 35 [Kgf/cm] a 6 [V] | 9.4 [Kgf/cm] a 4.8 [V] 13 [Kgf/cm] a 6 [V] |
| Voltaje | 4.8 [V] – 6 [V] | 4.8 [V] – 6 [V] |
| Consumo energía | 1 A | 500 [mA] – 900 [mA] (6A) |
| Rango Temperatura | -10 °C – 50 °C | 0°C – 55 °C |
| Imagen Referencial |  | |

Según las características de los servomotores seleccionados se incrementará la fuerza ejercida para la verificación del torque requerido sumando 3 pesos adicionales de 71 gramos para las 3 articulaciones y un peso de 55 gramos para el servomotor de la tenaza como efector final.

El cálculo resultante sugiere un torque de 13.39 [kg x cm] necesario para mover sin complicaciones cada articulación, por tanto, la selección de un servomotor de 35 kg alimentado a 6V, cumple con los requisitos y brinda la oportunidad para expansiones futuras como el cambio de herramientas en el actuador final y la capacidad de levantar un peso mayor.

Microcontrolador. Servir como tarjeta de adquisición, interpretación y envío de datos, con puertos analógicos y digitales para el envío de señales PWM destinadas al control de posición de los servomotores, lectura de los encoders para grabado de posición e interruptores digitales para selecciones de modos de funcionamiento.

Para el dimensionamiento del microcontrolador se considera el uso de 4 salidas analógicas para el control individual de cada servomotor, 3 entradas analógicas para el registro del grado de giro en cada etapa de grabado, 2 terminales para comunicación I2C en bus de comunicación serial para el registro de pulsos de los encoders absolutos, memoria flash de al menos 1MB de capacidad, microprocesador de al menos 32bits de preferencia con 2 núcleos para el manejo balanceado de un nodo bidireccional programado bajo el sistema operativo ROS.

Tabla 4

Datos técnicos microcontrolador

| Parámetros | ESP32 Node MCU | Arduino UNO R3 |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Tensión de funcionamiento | 3.3 [V] | 5 [V] |
| Consumo de corriente | 20 mA – 240 mA | 45 mA – 80 mA |
| Pines de E/S digitales PWM | 36 | 6 |
| Pines analógicos | 15 | 6 |
| SPI/I2C/I2S/UART | 4/2/2/2 | 1/1/1/1 |
| Rango Temperatura | -10 °C – 50 °C | 0°C – 55 °C |
| Memoria flash | 4MB | 32 KB |
| Costo referencial | 11 USD | 22 USD |
| Procesadores | dual | simple |

Encoder. Servir como capturador de los grados de giro en cada articulación en el proceso de grabado de posiciones.

Para la selección este tipo de componente eléctrico se considera 2 posibilidades: encoder incremental o encoder absoluto. Las características del primero demandan un ambiente de luz controlado al servirse de un haz de luz infrarrojo para determinar las interrupciones, por otro lado, el encoder absoluto rotativo, funciona con switches internos que determinan interrupciones mecánicas, para el grabado de posiciones el giro del encoder se interpreta con avances de 1 grado por vez.

Fuente de alimentación. Suministrar energía a los componentes electromecánicos. Para la selección de la fuente de poder se considera un equipo robusto con protecciones contra sobrevoltajes y cortocircuito, la demanda de corriente considerando todos los actuadores es de máximo 4 amperios, considerando esto se ha seleccionado una fuente de computador de mesa con regulador de tensión interna. Quasard Computer ATX500W.

Tabla 5

Datos técnicos fuente de alimentación

| Parámetros | Quasard Computer ATX500W |
|--------------------|---------------------------------|
| Voltaje de entrada | 110 [V AC]- 220 [V AC] |
| Voltaje de Salida | 5 [V DC] – 12 [V DC] |
| Potencia | 500 [W] |
| Amperaje máximo | 5 [A] |
| Frecuencia | 50 [Hz] – 60 [Hz] |

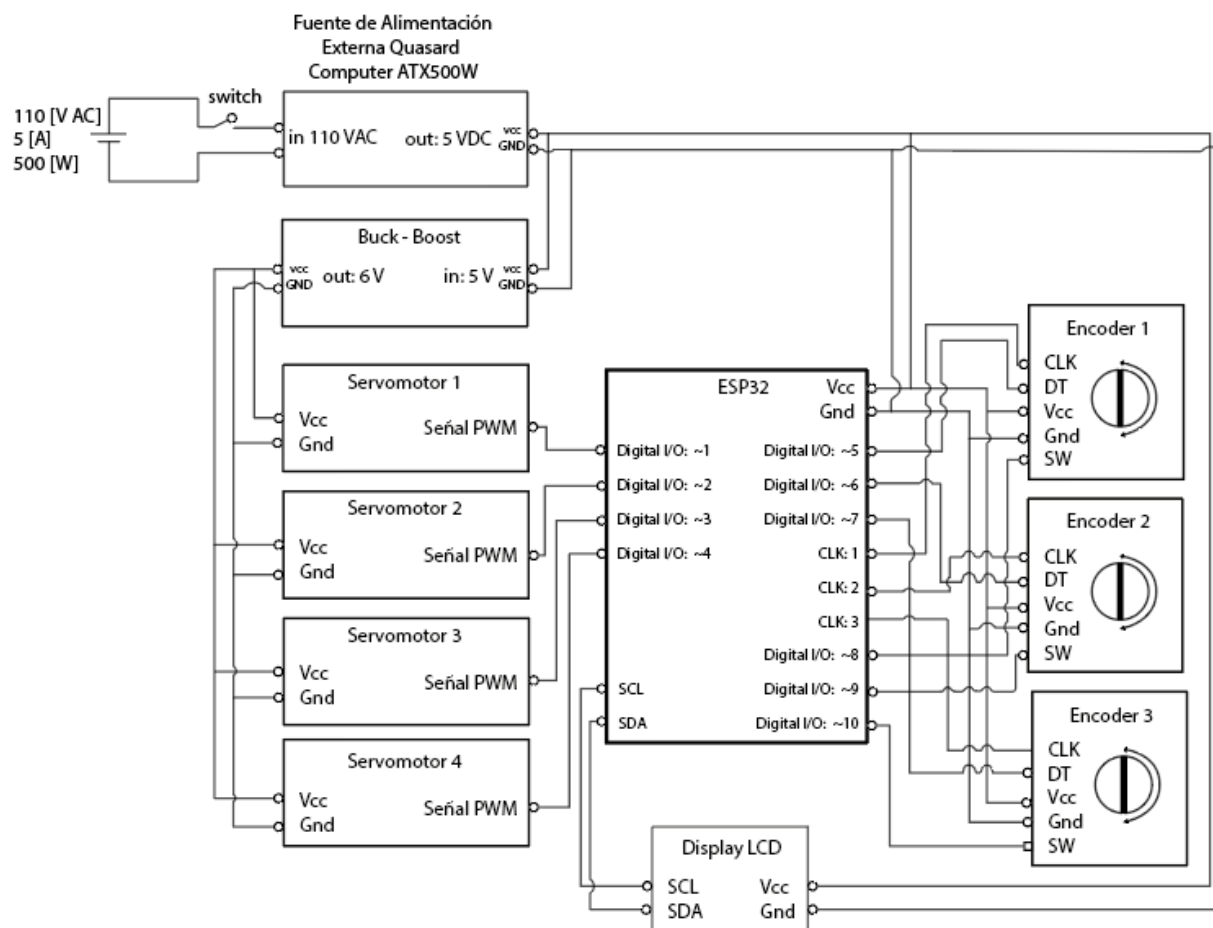
Imagen Referencial



Circuito eléctrico. Las conexiones eléctricas son presentadas en la figura 22.

Figura 22

Diagrama del circuito



Consumo energético. A continuación, en la tabla 6, se calcula el consumo energético que demanda el prototipo de cobot.

Tabla 6

Consumo energético de cobot

| Elemento | Cantidad | Consumo Corriente | |
|----------------------|----------|-------------------|------------------|
| | | Unitario [mA] | Total [mA] |
| Servomotor SPT5435LV | 3 | 1000 | 3000 |
| Servomotor MG996 | 1 | 500 | 500 |
| Encoders | 3 | 25 | 25 |
| Esp32 | 1 | 240 | 240 |
| TOTAL | | | 3765 [mA] |

Se demanda de una fuente que aporte al menos 3.8 Amperios. Por tanto, la fuente **Quasard Computer ATX500W** seleccionada con un aporte de hasta 5 A es más que suficiente para un desempeño óptimo del prototipo de cobot.

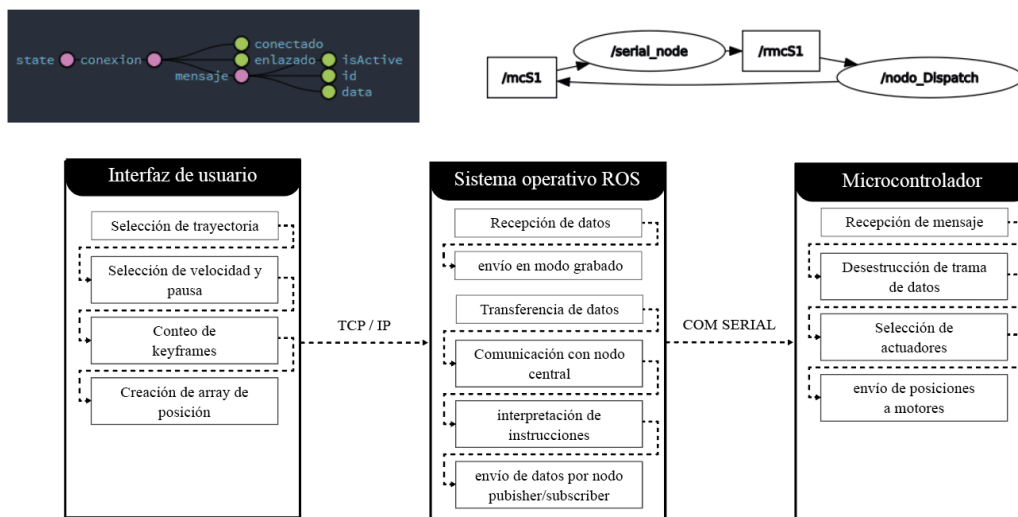
Componentes de control y software

El equipo propuesto abarca la utilización de software para brindar una interfaz amigable al usuario al momento de visualizar los datos procesados de trayectorias, esto por medio de los siguientes subsistemas.

Subsistema de transmisión de datos. Enviar de información de posición y señales de control desde la interfaz de usuario por protocolo TCP/IP hacia sistema operativo ROS y posteriormente por COM serial hacia el microcontrolador, la interpretación de los comandos ser los realizará por nodos de comunicación bidireccionales. En la figura 23, se muestra el diagrama de comunicación.

Figura 23

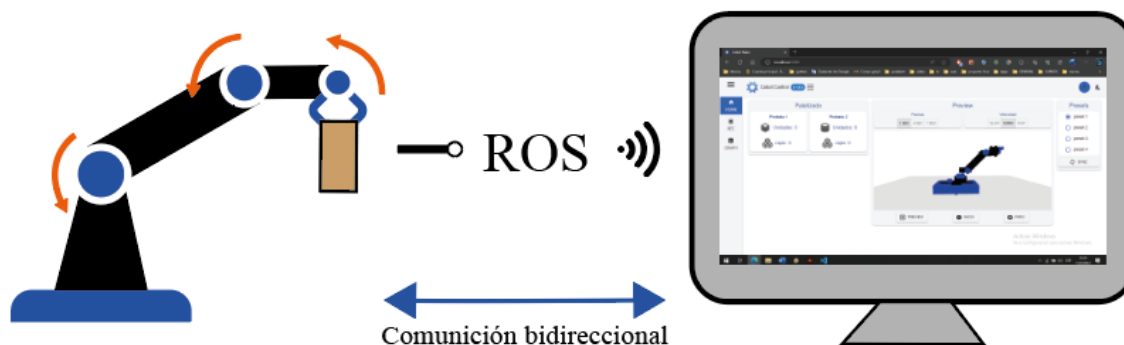
Diagrama de transmisión de datos

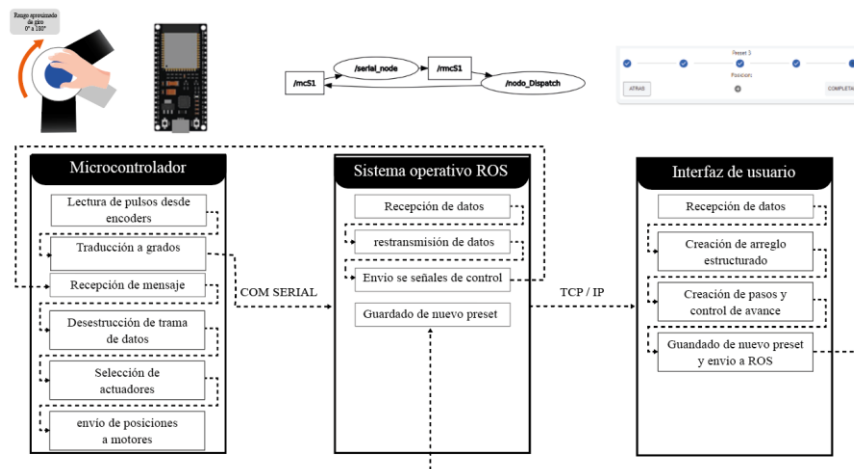


Subsistema de grabado de posiciones. Capturar los ángulos de giro de cada encoder correspondientes a los motores y procesarlos para guardar la cadena en arreglos por medio de la interfaz, el mensaje parte desde el microcontrolador hacia el sistema operativo de ROS y posteriormente al panel de grabado. En la figura 24, se muestra el diagrama de comunicación.

Figura 24

Diagrama de grabado de posiciones

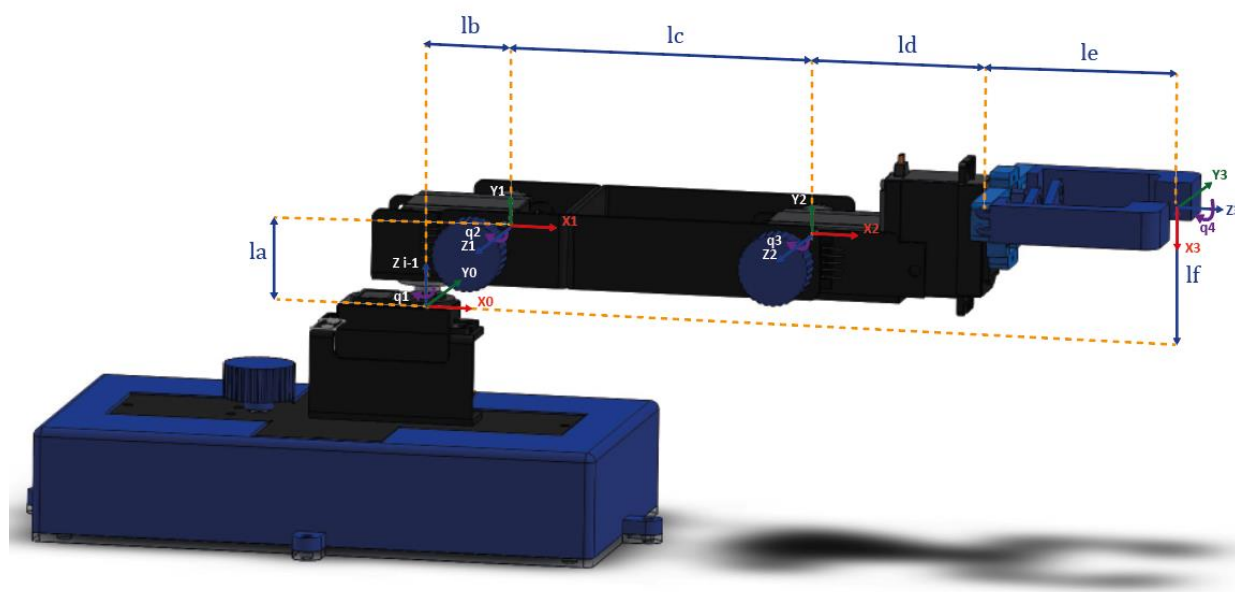




Criterio de selección de ejes

Figura 25

Criterio de selección de ejes



A partir de un conjunto de elementos representados en la figura 25, queda estructurada la disposición del cobot (asumiendo articulaciones de tipo rotacional) se halla la posición y orientación del efector final en el espacio tridimensional. Como se menciona en (Reyes Cortes, 2011), la representación general de Denavit-Hartenberg es la siguiente:

$$A_i^{i-1} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) * \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) * \sin(\theta_i) & \alpha_i * \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) * \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) * \cos(\theta_i) & \alpha_i * \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Cinemática directa

Los parámetros que rigen el prototipo de cobot de la figura 25 y la ecuación 1, estructuran la tabla de modelado para cinemática directa representada a continuación:

Tabla 7

Modelado de cinemática directa

| q | θ [°] | d [mm] | a [mm] | α [°] |
|---------|--------------|--------|--------|--------------|
| H_1^0 | q1 | la | 0 | +90 |
| H_2^1 | q2 | 0 | lb+lc | 0 |
| H_3^2 | q3-90 | 0 | 0 | -90 |
| H_4^3 | 0 | 0 | ld+le | 0 |

Aplicando los parámetros de la tabla superior en la matriz de la ecuación 1, obtenemos:

$$H_1^0 = \begin{pmatrix} \cos(q1) & 0 & \sin(q1) & 0 \\ \sin(q1) & 0 & -\cos(q1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$H_2^1 = \begin{pmatrix} \cos(q2) & -\sin(q2) & 0 & (lb+lc)\cos(q2) \\ \sin(q2) & \cos(q2) & 0 & (lb+lc)\sin(q2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$H_3^2 = \begin{pmatrix} \sin(q3) & 0 & \cos(q3) & 0 \\ -\cos(q3) & 0 & \sin(q3) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$H_4^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & ld & le \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

La descripción completa está dada por:

$$H_4^0 = H_1^0 \cdot H_2^1 \cdot H_3^2 \cdot H_4^3$$

$$H_4^0 = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \\ i & 0 & j & k \\ 0 & 0 & 0 & l \end{pmatrix} \quad (6)$$

Donde

$$a = \sin(q_2) \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_3) + \sin(q_3) \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2)$$

$$b = -\sin(q_1)$$

$$c = -\sin(q_2) \cdot \sin(q_3) \cdot \cos(q_1) + \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_3)$$

$$d = (lb + lc) \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) + (ld + le) \cdot (-\sin(q_2) \cdot \sin(q_3) \cdot \cos(q_1) + \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_3))$$

$$e = \sin(q_1) \cdot \sin(q_2) \cdot \cos(q_3) + \sin(q_1) \cdot \sin(q_3) \cdot \cos(q_2)$$

$$f = \cos(q_1)$$

$$g = -\sin(q_1) \cdot \sin(q_2) \cdot \sin(q_3) + \sin(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_3)$$

$$h = (lb + lc) \cdot \sin(q_1) \cdot \cos(q_2) + (ld + le) \cdot (-\sin(q_1) \cdot \sin(q_2) \cdot \sin(q_3) + \sin(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_3))$$

$$l = la + (lb + lc) \cdot \sin(q_2) + (ld + le) \cdot (\sin(q_2) \cdot \cos(q_3) + \sin(q_3) \cdot \cos(q_2))$$

Las longitudes de los eslabones correspondientes a la figura 25 se presentan a continuación:

- $la = 26.15$ [mm]
- $lb = 21.88$ [mm]
- $lc = 109$ [mm]
- $ld = 66.58$ [mm]
- $le = 56.71$ [mm]

- $l_f = 38.42$ [mm]
- $q_1 = 90^\circ$
- $q_2 = 90^\circ$
- $q_3 = 90^\circ$

Estos valores se reemplazan en la ecuación 6, simplificándola de manera significativa, considerando los ángulos de giro iguales a 90 grados para las 3 primeras articulaciones, con el fin de situar al robot en la posición donde logra su máxima longitud.

$$H_1^0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & lb + lc + ld + le \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & l_a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 254.17 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 26.15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Dinámica del cobot

Para obtener el modelo dinámico del prototipo de cobot se usa las ecuaciones de Euler-Lagrange las cuales se presentan a continuación:

$$\tau = \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (8)$$

$$L = K - P \quad (9)$$

$$K = k_i + k_r \quad (10)$$

En la ecuación 10 se muestra que la energía cinética tiene una componente de traslación lineal K_i y otras k_r rotacional.

Desde el punto de vista vectorial K_i se entiende como:

$$k_i = \frac{1}{2} \cdot m [v_x \ v_y \ v_z] \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} m v^t \cdot v \quad (11)$$

Mientras tanto, Kr se define de la siguiente manera:

$$k_i = \frac{1}{2} \cdot [w_x \ w_y \ w_z] \cdot \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} w^t \cdot I w \quad (12)$$

Donde:

m = Masa del cuerpo.

I = Matriz de inercia 3x3.

Jacobiano. La matriz jacobiana está compuesta de dos sistemas de referencia relacionados entre sí, considera el espacio de trabajo donde las juntas de trabajo se estructuran de la siguiente manera:

$$j\omega_n = [{}^0R_0\vec{z}, {}^0R_1\vec{z} \dots {}^0R_{n-1}\vec{z}] \quad (13)$$

$$jv_n = [{}^0R_0\vec{z} \cdot ({}^0P_n - {}^0P_0), {}^0R_1\vec{z} \cdot ({}^0P_n - {}^0P_1) \dots {}^0R_{n-1}\vec{z} \cdot ({}^0P_n - {}^0P_{n-1})] \quad (14)$$

Donde:

0R_N = Matriz de rotación de articulación n.

0P_N = Vector de posición de articulación n.

Velocidad lineal y angular. Con el jacobiano hallado anteriormente se hallan las velocidades lineales y angulares de cada eslabón, por medio de la siguiente ecuación.

$$v_n = jv_n \cdot \dot{q} \quad (15)$$

$$\omega_n = {}^0R_N \cdot j\omega_n \cdot \dot{q} \quad (16)$$

Donde:

\dot{q} = Vector de velocidades angulares.

Energía cinética lineal. Esta energía relaciona la masa del eslabón con su velocidad lineal.

$$Kv_n = \frac{1}{2} \cdot v_n^T \cdot m_n \cdot v_n \quad (17)$$

Donde:

m_n = Masa del eslabón n.

v_n = Velocidad lineal del eslabón n.

Energía cinética rotacional. Esta energía relaciona la inercia del eslabón con su velocidad angular.

$$K\omega_n = \frac{1}{2} \cdot \omega_n^T \cdot I_n \cdot \omega_n \quad (18)$$

Donde:

I_n = Inercia del eslabón n.

ω_n = Velocidad angular del eslabón n.

Energía potencial. Esta energía relaciona la masa del eslabón, la gravedad y altura del eslabón.

$$V_n = m_n \cdot g \cdot {}^0H_n \quad (19)$$

Donde:

m_n = Masa del eslabón n.

g = Valor de gravedad.

0H_n = Altura del eslabón n.

Lagrangiano. Permite establecer el balance de energético tomado en cuenta los valores de energía cinética y potencial explicados anteriormente. Se representa por medio de la siguiente ecuación:

Subdivisión de matriz primaria.

$$\left(\begin{bmatrix} -130.88 \sin(q_1) \cos(q_2) & -130.88 \sin(q_2) \cos(q_1) & 0 \\ 130.88 \cos(q_1) \cos(q_2) & -130.88 \sin(q_1) \sin(q_2) & 0 \\ 0 & 130.88 \sin^2(q_1) \cos(q_2) + 130.88 \cos^2(q_1) \cos(q_2) & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & \sin(q_1) & \sin(q_1) \\ 0 & -\cos(q_1) & -\cos(q_1) \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \quad (22)$$

Con el cálculo de la dinámica del cobot se obtienen los torques necesarios para desplazar cada eslabón del equipo y la carga previamente establecida. Para este cálculo se la matriz de cinemática directa y la matriz de inercias de cada pieza mecánica presente en la tabla 8.

Tabla 8

Matriz de inercia y valor de masa de eslabones

| Número de eslabón | Masa [kg] | Matriz de inercias [kg m ²] |
|-------------------|-----------|--|
| 1 | 0.0426 | $\begin{bmatrix} 6.64 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 1.57 \cdot 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 1.88 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$ |
| 2 | 0.0482 | $\begin{bmatrix} 9.26 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 1.85 \cdot 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 2.28 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$ |
| 3 | 0.151 | $\begin{bmatrix} 1.27 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 1.76 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 2.86 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$ |
| Carga | 0.02 | $\begin{bmatrix} 1.11 \cdot 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 2.44 \cdot 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 2.96 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$ |

Cálculo de energías – Velocidad angular.

Primer eslabón

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \dot{q}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Segundo eslabón

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \cdot \sin(q_2) \\ \dot{q}_1 \cdot \cos(q_2) \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Tercer eslabón

$$\begin{bmatrix} -\dot{q}_1 \cdot \cos(q_2 + q_3) \\ -\dot{q}_2 - \dot{q}_3 \\ -\dot{q}_1 \cdot \sin(q_2 + q_3) \end{bmatrix} \quad (25)$$

Cálculo de energías – Velocidad lineal.

Primer eslabón

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Segundo eslabón

$$\begin{bmatrix} -130.88 \cdot \dot{q}_1 \cdot \sin(q_1) \cdot \cos(q_2) - 130.88 \cdot \dot{q}_2 \cdot \sin(q_2) \cdot \cos(q_1) \\ 130.88 \cdot \dot{q}_1 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) - 130.88 \cdot \dot{q}_2 \cdot \sin(q_1) \cdot \sin(q_2) \\ 130.88 \cdot \dot{q}_2 \cdot \cos(q_2) \end{bmatrix} \quad (27)$$

Tercer eslabón

$$\begin{bmatrix} -130.88 \cdot \dot{q}_1 \cdot \sin(q_1) \cdot \cos(q_2) - 130.88 \cdot \dot{q}_2 \cdot \sin(q_2) \cdot \cos(q_1) \\ 130.88 \cdot \dot{q}_1 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) - 130.88 \cdot \dot{q}_2 \cdot \sin(q_1) \cdot \sin(q_2) \\ 130.88 \cdot \dot{q}_2 \cdot \cos(q_2) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Cálculo de energías – Energía cinética rotacional.

$$\begin{aligned}
 & ([0.079 \cdot \dot{q}_1^2], [0.037 \cdot \dot{q}_1^2 \cdot \sin^2(q_2) + 0.009 \cdot \dot{q}_1^2 + 0.11 \cdot \dot{q}_2^2], \\
 & [1.43 \cdot \dot{q}_1^2 \cdot \sin^2(q_2 + q_3) + 0.637 \cdot \dot{q}_1^2 \\
 & \cdot \cos^2(q_2 + q_3) + 0.88 \cdot (\dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2]) \quad (29)
 \end{aligned}$$

Cálculo de energías – Energía lineal.

$$\begin{aligned}
 & ([0], [412.83^{-6} \cdot \dot{q}_1^2 \cdot \sin^2(q_2) + 412.83^{-6} \cdot \dot{q}_2^2], \\
 & [1293.28^{-6} \cdot \dot{q}_1^2 \cdot \cos^2(q_2) + 1293.28 \cdot \dot{q}_1^2]) \quad (30)
 \end{aligned}$$

Cálculo de energías – Energía potencial.

$$\begin{aligned}
 & ([564840^{-6}], [2827008^{-6} \cdot \sin(q_2) + 564840^{-6}], \\
 & [2827008^{-6} \cdot \sin(q_2) + 564840^{-6}]) \quad (31)
 \end{aligned}$$

Del análisis realizado se obtiene el lagrangiano, restando las resultantes de la energía lineal K_{vi} de las velocidades lineales V_i . Posterior a este cálculo se determinará que el eslabón 2 recibe la mayor carga. Calculando la enésima diferencia discreta a lo largo del eje dado con la función *numpy.diff*, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 & [0.037 \cdot \dot{q}_1^2 \cdot \sin^2(q_2) + 1.43 \cdot \dot{q}_1^2 \\
 & \cdot \sin^2(q_2 + q_3) + 1706.105^{-6} \cdot \dot{q}_1^2 \\
 & \cdot \cos^2(q_2) + 0.637 \cdot \dot{q}_1^2 \cdot \cos^2(q_2 + q_3) + 0.088 \cdot \dot{q}_1^2 \quad (32) \\
 & + 1706.105^{-6} \cdot \dot{q}_2^2 \\
 & \cdot 0.88 \cdot (\dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 - 5654016^{-6} \cdot \sin(q_2) - 1694520^{-6}]
 \end{aligned}$$

Cálculo de torques

Por medio de la ecuación de Euler-Lagrange se obtiene los cálculos de energías hasta llegar la lagrangiano cuya expresión proporciona un mejor dimensionamiento del torque requerido para los servomotores, este valor es hallado derivando parcialmente con respecto a su espacio articular y sus velocidades, obteniéndose así una expresión en función del tiempo para cada eslabón, la cual se presenta a continuación.

$$\tau_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (33)$$

Donde:

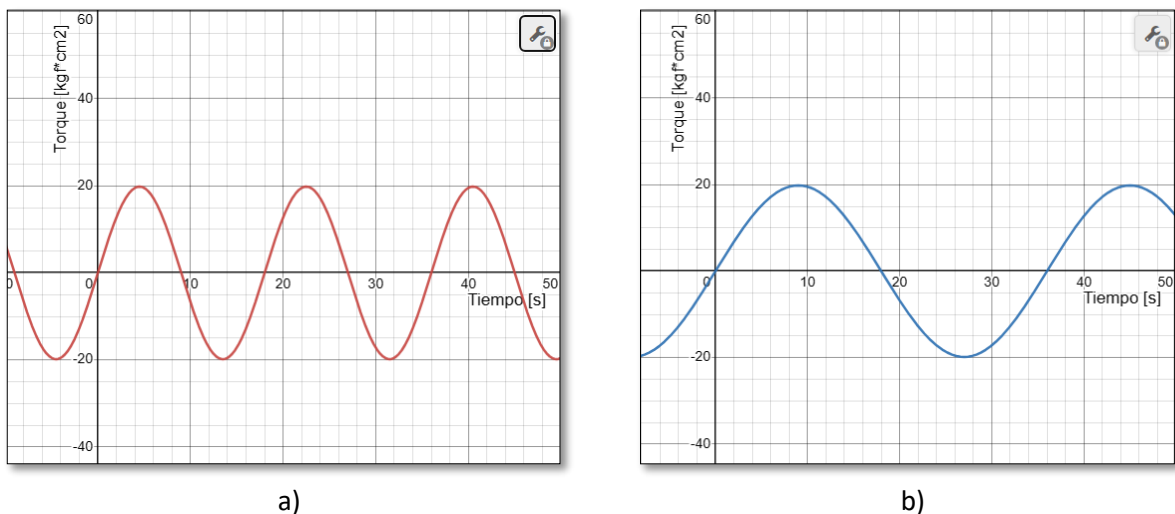
τ_i = Torque requerido para mover cada articulación.

\dot{q}_1 = Velocidad constante de cada motor de 4° por segundo.

Con el remplazo de los valores de velocidad y masa de cada articulación en las ecuaciones presentadas de Euler-Lagrange se obtiene las funciones de las 2 articulaciones con mayor estrés, cuyo valor máximo será el considerado para el dimensionamiento de los servomotores. Véase Figura 27.

Figura 27

Grafica de torques. a) Segunda articulación, b) Tercera articulación



Considerando las gráficas anteriores se observa que se requiere de un torque máximo de $20 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, comparando este valor con el torque teórico del servomotor SPT de $35 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$, observamos que este tipo de actuador es capaz de desempeñar su función sin problema en cada una de las articulaciones.

Resumen

El Capítulo 3 describe en detalle la metodología empleada para la planificación de la arquitectura del cobot, teniendo en cuenta las necesidades específicas del prototipo. Se abordaron diversos aspectos clave, como la manufactura, desempeño, seguridad, interfaz de usuario y costo, utilizando una tabla de ranking basada en la Casa de la Calidad (HOQ) para establecer prioridades y seleccionar los materiales más adecuados para la construcción del prototipo. Este enfoque permitió optimizar el diseño y garantizar que cada elemento del cobot se ajustara a los requisitos planteados.

El análisis incluyó un estudio exhaustivo de cargas en cada una de las piezas y eslabones del equipo. Al evaluar las fuerzas y tensiones presentes en el sistema, se aseguró que el cobot es lo suficientemente robusto, en diversos entornos de trabajo. Los resultados de este análisis proporcionaron valiosa información para la selección de materiales y la mejora de la durabilidad y fiabilidad del prototipo.

Se abordó el modelo cinemático, dinámico, construcción y funcionamiento del cobot. Los cálculos se realizaron planteando ejes de referencia para cada movimiento, representados por medio de la metodología de Denavit-Hartenberg, se definió una matriz de posición y rotación para determinar las coordenadas del actuador final en todo momento, este análisis sirvió para validar el desempeño del cobot comparando la posición teórica con la posición real en las pruebas de funcionamiento. El estudio dinámico permitió representar el estado de mayor estrés para cada una de las articulaciones, el estudio incluyó cálculo de velocidades: angular y lineal y energías: cinética rotacional, lineal y potencial. Con esto se determinó el torque requerido para mover los eslabones sometidos a cargas dinámicas, permitiendo hacer un adecuado dimensionamiento de los servomotores.

Además de los aspectos mecánicos, el capítulo 3 se centró en los componentes eléctricos y de control del cobot. Se presentaron detalladamente los diagramas que describen el flujo de información desde la interfaz de usuario hasta el microcontrolador. Este proceso permitió entender cómo se establece la comunicación entre el operador y el cobot y cómo se traducen las instrucciones en señales de control PWM para los actuadores.

Capítulo 4

Construcción, funcionamiento y pruebas de rendimiento

En el capítulo 4. Detalla una guía completa de funcionamiento desde su conexión hasta el proceso de grabado asistido, explicando la estructura de las formas clave que conforman las secuencias de trabajo, el flujo de información desde la interfaz hacia el equipo físico.

Se recopila las pruebas de funcionamiento realizadas con el cobot, con la finalidad de evaluar su rendimiento, basado en la (ISO 9283, 1998), que describe una serie de normas internacionales que tratan sobre la manipulación de robots industriales, cubriendo temas como la seguridad y características generales, sistemas de coordenadas, terminología e interfaz mecánicas. Las pruebas descritas en esta norma internacional se pueden aplicar en su totalidad o en parte según el tipo de robot y requisitos.

Construcción

La construcción del cobot, tuvo su punto de partida con el diseño de las piezas mecánicas necesarias para su estructura. Los eslabones, fundamentales para el movimiento del cobot, fueron fabricados a partir de planchas de acero inoxidable, garantizando su resistencia y durabilidad.

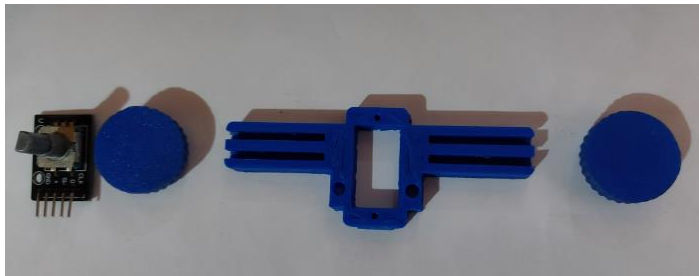
Por otro lado, los componentes adicionales, fueron creados mediante la impresión en 3D. Este proceso de fabricación aditiva permitió obtener piezas con formas y geometrías precisas, adecuadas para su integración en el ensamblaje general. A continuación, se muestra una galería de imágenes de las piezas mecánicas y su función en el ensamblaje final.

Figura 28

Ensamble tapa de circuito

**Figura 29**

Piezas impresas 3D en material PLA

**Figura 30**

Actuador final modular

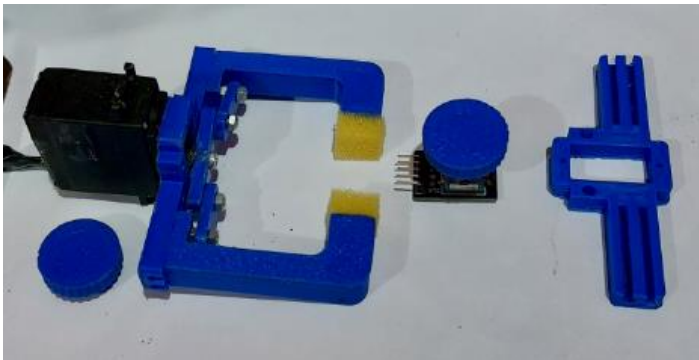
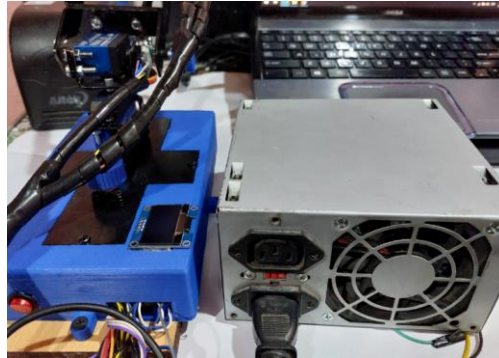


Figura 31

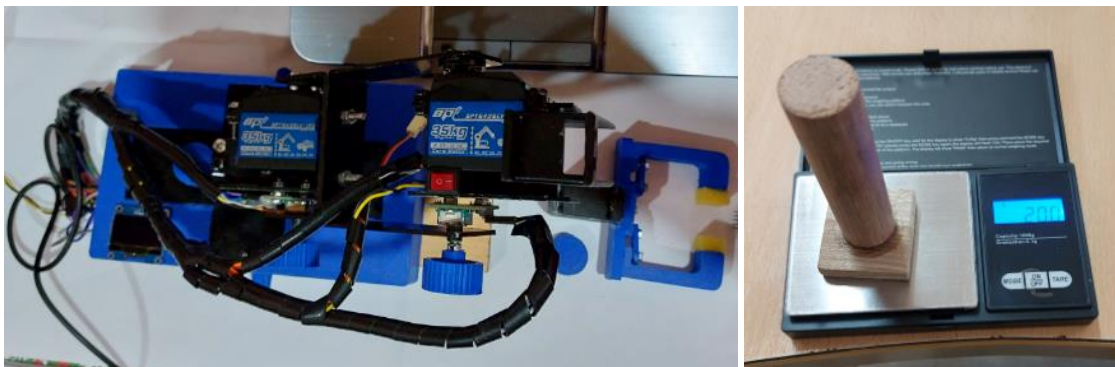
Fuente de poder cobot

**Figura 32**

Dobles de piezas de acero inoxidable

**Figura 33**

Vista Superior cobot y peso de probeta utilizada



Ensamblaje

La base del cobot contiene la placa de circuitos y sobre ella se asienta la base del cobot. Para lograr una mayor durabilidad, la base está reforzada con una placa de acero donde se atornilla el eslabón. Posteriormente, se coloca el servomotor y se alinea utilizando los cuatro agujeros de sujeción, asegurando que los eslabones posteriores mantengan estabilidad y que el centro de gravedad permita realizar movimientos sin desestabilizar el equipo.

Las piezas mecánicas que actúan como base para los servomotores del hombro y del brazo tienen las mismas dimensiones, con la finalidad de minimizar el factor de convergencia cuando el acople de extensión del brazo está conectado. Una de las optimizaciones realizadas en el diseño fue utilizar el vástago del encoder como eje guía para el servomotor del segundo eje, como se puede observar en la figura 34.

Figura 34

Diagrama de ensamble de cobot

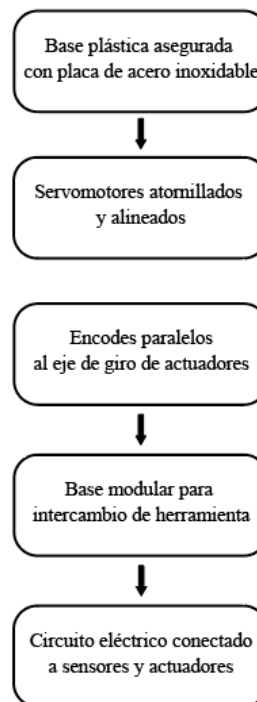
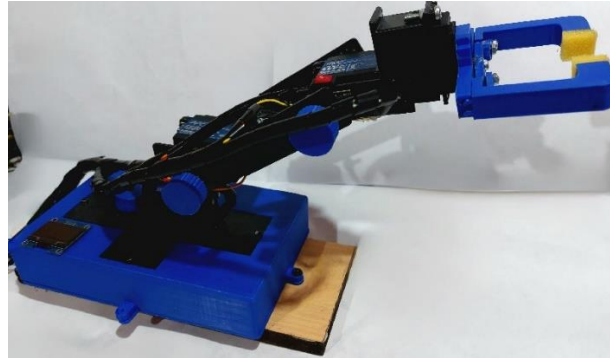


Figura 35

Cobot construcción física



Configuración inicial del equipo

A continuación, se detallan los pasos a seguir para establecer comunicación entre el sistema operativo ROS, la interfaz de usuario y el prototipo de cobot construido.

1. **Inicie S.O Linux:** Desde un computador externo o por medio de una máquina virtual, arranque el sistema operativo Linux, en este caso práctico se trabaja bajo la distribución de Ubuntu en su versión 20.04 LTS. Verifique que los paquetes de ROS y Python3 funcionen correctamente y que el computador o máquina virtual tengan una conexión estable de internet por medio de un proveedor o por medio de red local. Véase Figura 36.

Figura 36

Inicio de sistema operativo ROS

```

user@ubuntu: ~
└─$ sudo apt-get install ros-noetic-desktop-full
...
user@ubuntu:~$ python3 --version
Python 3.8.10
user@ubuntu:~$
  
```

2. **Ejecución de nodos:** Desde una terminal ejecute verifique que el nodo maestro >> *roscore* esté funcionando y a continuación ejecute el nodo >> *wsnode.py*, el cual establece comunicación con la interfaz.

Nótese que el nodo informa si la interfaz está disponible y se enlaza de manera automática entregando el mensaje: “conectado” y “desconectado” según sea el caso. Véase Figura 37.

Figura 37

Inicio de nodo de comunicación

The screenshot shows a terminal window with two panes. The top-left pane shows a terminal prompt 'user@ubuntu:~\$' with a cursor. The top-right pane shows the command 'roscore http://ubuntu:11311/80x11' being executed, followed by the output 'connected'. The bottom pane shows the output of the 'roscore' command, including the start of a new master node and the start of the 'rosout' service.

```

user@ubuntu: ~
user@ubuntu: ~ 38x11
user@ubuntu:~$ 
user@ubuntu:~$ roscore http://ubuntu:11311/80x11
connected
roscore http://ubuntu:11311/80x11
NODES
auto-starting new master
process[master]: started with pid [3730]
ROS_MASTER_URI=http://ubuntu:11311/

setting /run_id to c346a668-2725-11ee-ab70-ef8736616243
process[rosout-1]: started with pid [3749]
started core service [/rosout]

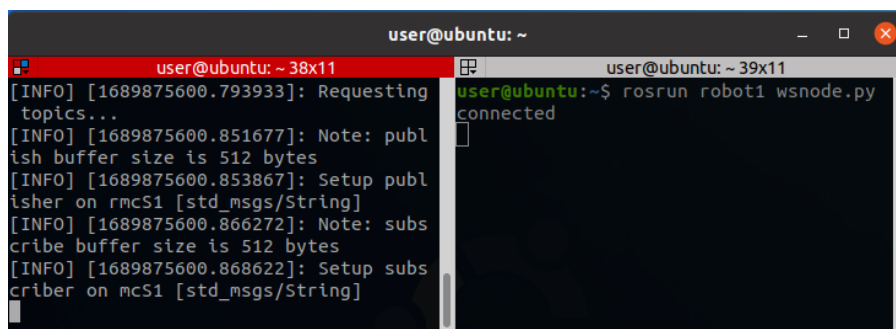
```

3. **Comunicación serial:** Conecte le cable USB del cobot al computador donde se ejecuta el Sistema operativo ROS. En distribución Linux, el nombre del puerto por defecto se lista de la siguiente manera: `ttyUSB0`.

El identificador único debe ser parte de la instrucción de arranque de comunicación serial (En pantalla se observa los tópicos de intercambio: `rmcs1` y `mcsS1` correspondiente a los nodos publicador y subscriptor respectivamente, indicando una correcta continuación entre el equipo y el sistema operativo). Véase Figura 38.

Figura 38

Comunicación serial



```

user@ubuntu: ~
[INFO] [1689875600.793933]: Requesting topics...
[INFO] [1689875600.851677]: Note: publish buffer size is 512 bytes
[INFO] [1689875600.853867]: Setup publisher on rmcS1 [std_msgs/String]
[INFO] [1689875600.866272]: Note: subscribe buffer size is 512 bytes
[INFO] [1689875600.868622]: Setup subscriber on mcS1 [std_msgs/String]

user@ubuntu: ~
user@ubuntu:~$ rosrun robot1 wsnode.py
connected

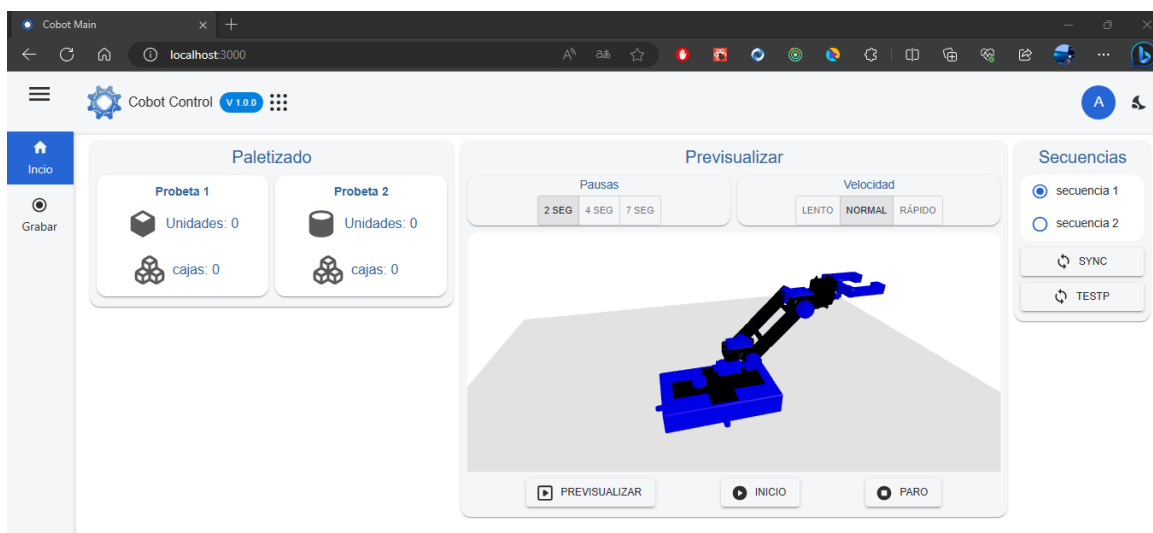
```

4. **Inicio de interfaz de usuario:** En principio el servicio de interfaz puede ser montado en un host o ser arrancado desde un servidor local, en este caso se ha montado la interfaz en el puerto 3000 del computador con sistema operativo Windows conectado a la misma red.

Al trabajar bajo comunicación tcp / ip se amplían las ventajas de funcionamiento puesto que la interfaz de usuario y el sistema operativo ROS pueden trabajar en computadores independientes y balancear de mejor manera los recursos de software, logrando un mejor desempeño. Véase Figura 39.

Figura 39

Inicio de interfaz de usuario

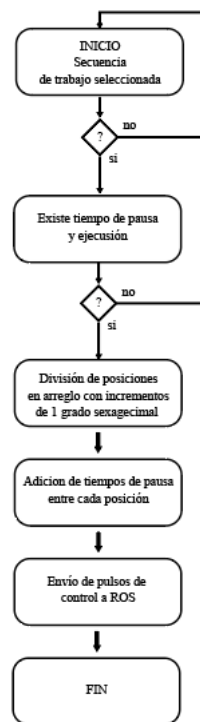


Selección y ejecución de secuencia de trabajo

El cobot dispone de un listado de secuencia de trabajo listas para ser simuladas por el gemelo digital o para ser ejecutadas por el equipo físico, ambas acciones son el resultado de una secuencia de pasos que son verificados por el software para el vicio de señales de control. Véase diagrama de la figura 40.

Figura 40

Selección ejecución de secuencia de trabajo

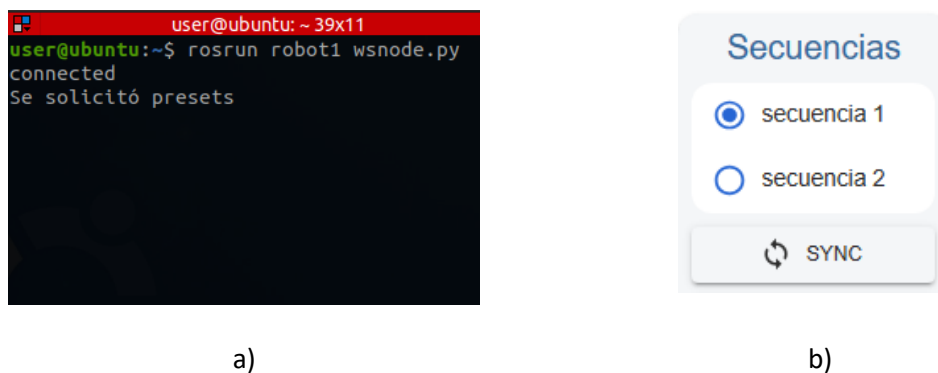


Por medio de la interfaz de usuario el operador puede seleccionar del menú de secuencias la trayectoria que desee y previsualizarla en su pantalla o ejecutarla de manera inmediata, los pasos a seguir para realizar estas acciones son las siguientes:

1. **Sincronización de secuencias:** Desde el botón de sincronizar la interfaz solicita al sistema operativo las secuencias de trabajo, previamente configurados y los lista para que estos puedan ser elegidos dependiendo de la necesidad del operador. Véase Figura 41.

Figura 41

Selección de secuencias desde interfaz de usuario a) Mensaje ROS, b) Interfaz



2. **Previsualización de trayectoria:** Una vez seleccionada la secuencia de trabajo por medio del botón “PREVISUALIZAR”, el usuario es capaz de ver el movimiento que seguirá el cobot en 3 dimensiones para asegurarse que la trayectoria a seguir es la adecuada conforme sus necesidades. Véase Figura 42.

Figura 42

Previsualización de trayectoria guardada



3. **Inicio de trayectoria:** Una vez escogida la secuencia de trabajo por medio del botón **“INICIO”**, la interfaz inicia el envío secuencial de posiciones hacia ROS y posteriormente al cobot físico, cabe mencionar que el control de movimiento incluye la configuración de velocidad y tiempo de espera entre posiciones entregando 3 modos de desempeño (LENTO, NORMAL, RÁPIDO).

Las configuraciones corresponden a la cantidad de milisegundo que se tarda en enviar las nuevas posiciones hacia el cobot. El tiempo de espera también tiene 3 modos disponibles (2 SEG, 4 SEG, 7 SEG) haciendo referencia al tiempo de espera entre cada posición, con la finalidad de brindar mayor flexibilidad al usuario para controlar el trabajo. Adicionalmente se incluyó controles para pausar y detener el movimiento en curso, precautelando la integridad del usuario se muestra un mensaje de confirmación en caso de que el cobot regrese a su posición base. Véase Figura 43.

Figura 43

Inicio y control de trayectoria guardada



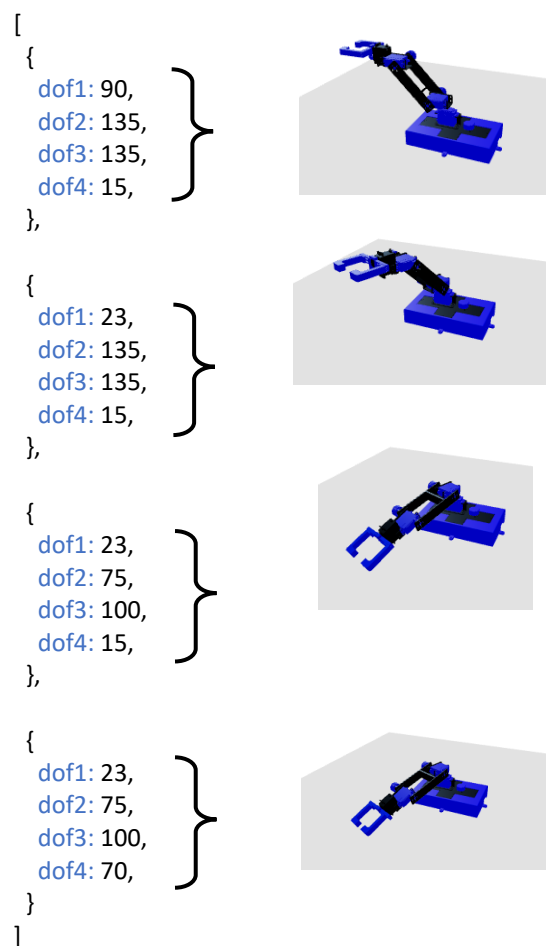
Estructura de formas clave para secuencias de trabajo

Las formas clave llamadas o “*shape key*”, son formaciones de datos agrupados en una colección denominada “*arrays*”, los datos son agrupados de tal forma que pueden ser recorridos, modificados o ampliados, según la cantidad de datos que se desee almacenar.

Cada articulación es identificada por las siglas (dofN), donde N, es el número de articulación que forma parte del movimiento a ser grabado, en la figura 44, se muestra una secuencia guardada para inclinar el cobot, acompañado a la colección de datos se muestra el desempeño del cobot animado por su gemelo digital incluido en la interfaz.

Figura 44

Estructura de formas clave



Grabado de posiciones

En caso de no contar con la secuencia de trabajo requerida, el cobot es capaz de guardar nuevas secuencias, asistido por medio de la interfaz de manera gráfica, se puede observar la cantidad de pasos generados e ir recorriéndolos de inicio a fin. Los pasos que seguir son los siguientes:

1. **Selección en modo de grabado desde la interfaz de control:** En el apartado de menú seleccionar REC para abrir sección de grabado, véase figura 45 punto 1.

Figura 45

Interfaz de usuario en modo grabado



Seleccionar nuevo para agregar el nombre de la nueva secuencia, por ejemplo “Secuencia 3”, véase figura 45 punto 2 y figura 46.

Figura 46

Campo para ingreso de nombre correspondiente a la nueva secuencia

2. **Grabado manual de posiciones:** El usuario moverá a voluntad cada uno de los actuadores por medio de los encoders absolutos, pulsando y cambiando la posición del cobot hasta el lugar deseado. Véase figura 47.

Figura 47

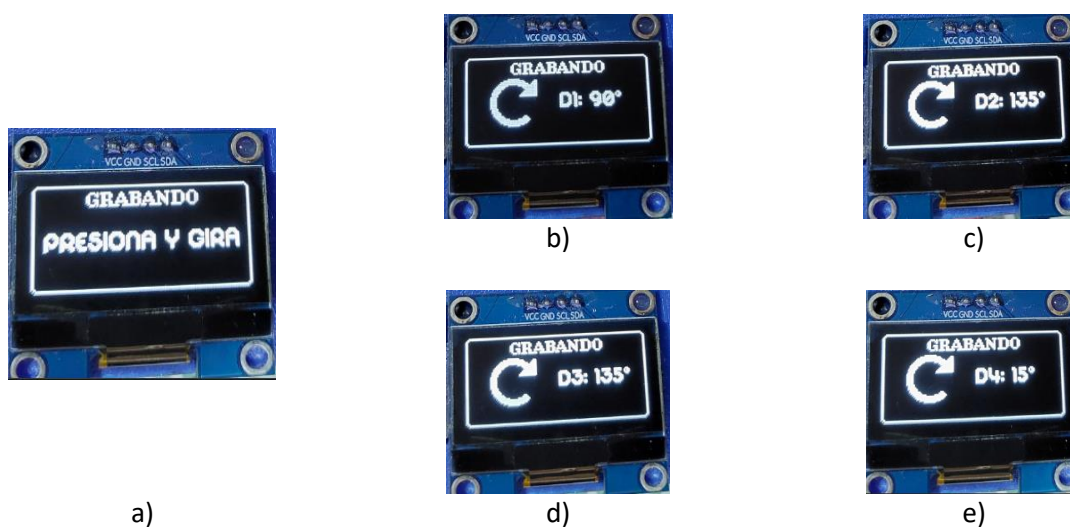
Grabado manual de posiciones



Como medida complementaria, el equipo cuenta con una pantalla LCD física, con el mensaje “Presiona y gira”, instruyendo al usuario a seleccionar la articulación de interés y mostrando en tiempo real, los grados de giro efectuados. En la figura 48 se muestra cada uno de los mensajes de la pantalla.

Figura 48

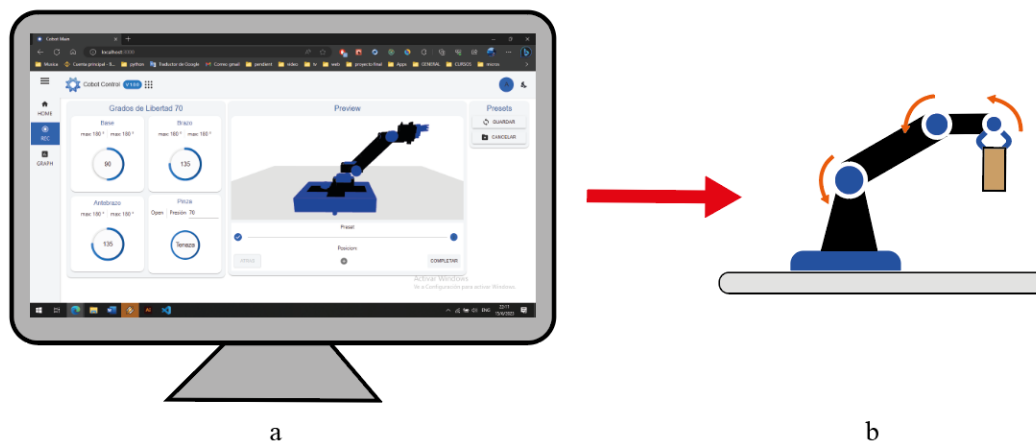
Información de grabado por pantalla LCD a) Instrucciones, b) Grabado D1, c) Grabado D2, d) Grabado D3, e) Grabado D4.
(Fuente propia)



La información de cambio de posición también se ve reflejada en la interfaz, como se observa en la figura 49.

Figura 49

Grabado de posiciones a) Interfaz de control, b) robot

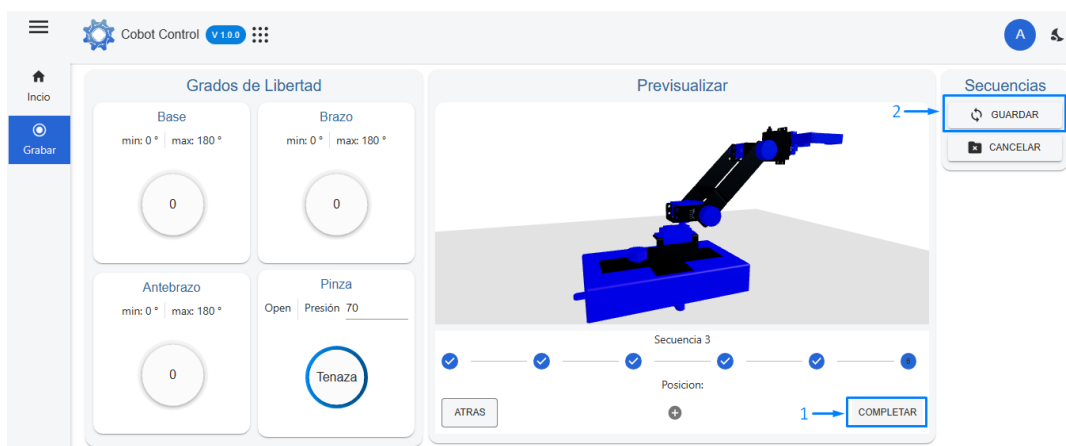


3. Guardado y sincronización de la secuencia de trabajo: Una vez completada la secuencia deseada el usuario al presionar “COMPLETAR” se tendrá de manera local la secuencia generada. Véase figura 50 punto 1.

Para sincronizar los cambios con el sistema operativo de ROS se presiona “GUARDAR” para enviar la nueva secuencia grabada y agregarla al listado original previamente programado.

Figura 50

Guardado y sincronización de la nueva secuencia de trabajo



Pruebas de rendimiento

La norma (ISO 9283, 1998), que describe una serie de normas internacionales que tratan sobre la manipulación de robots industriales, cubriendo temas como la seguridad y características generales, sistemas de coordenadas, terminología e interfaz mecánicas. Las pruebas descritas en esta norma internacional se pueden aplicar en su totalidad o en parte según el tipo de robot y requisitos.

Alcance

En base a lo anteriormente expuesto por la norma, se lista las siguientes características de rendimiento a ser evaluadas en el cobot:

- Precisión de distancia
- Repetibilidad de distancia

Consideraciones previas

Para la realización de las pruebas, el cobot debe estar completamente ensamblado y operativo. Todas las operaciones de sujeción, alineación y ubicación en la mesa de trabajo han sido previamente establecidas. Las pruebas realizadas fueron realizadas en las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Los datos de posicionamiento y orientación medidos (x , y , z , a , b , c) se expresan en base a la norma guía, las unidades de medida de desplazamiento se realizarán en milímetros y la unidad de medida usada para la orientación será grados sexagesimales, 5 puntos de evaluación se muestran en la figura 51.

Todos los ensayos realizados serán con probetas al 100% de carga nominal, es decir igual masa, posición del centro de gravedad, momentos de inercia, según el estudio planteado.

En la tabla 8, se establecen las cargas de utilizadas y las características a probar, conforme el anexo A, presentado en la norma (ISO 9283, 1998).

Tabla 9

Cargas de prueba

| Características que probar | Carga a utilizar | |
|-----------------------------------|------------------------|--|
| | 100 % de carga nominal | Masa de carga nominal reducido el 10 % |
| Precisión de distancia | X | NO |
| Repetibilidad de distancia | X | NO |

En la tabla 9, se estructura la hoja informativa del reporte de pruebas, conforme el anexo C, presentado en la norma (ISO 9283, 1998).

Figura 51

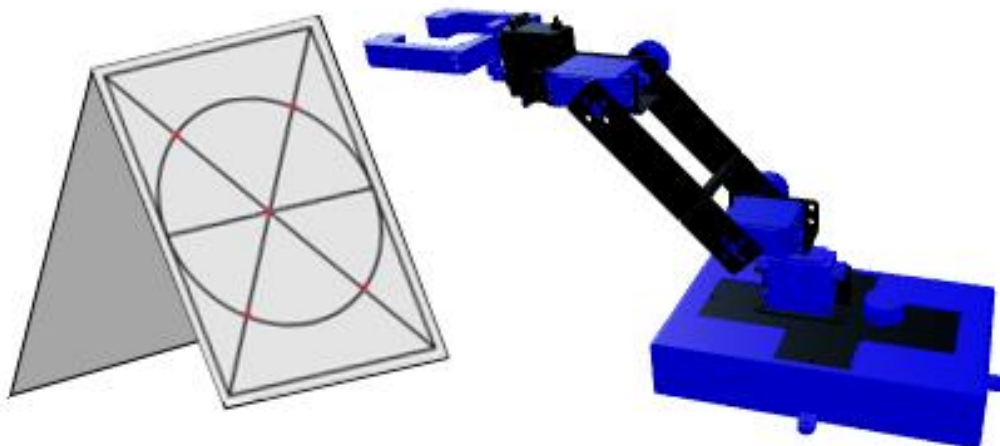
Tablero de evaluación

Tabla 10.

Reporte de pruebas

| Reporte de pruebas | |
|---|---|
| Cobot | Control de sistema |
| Manufactura: Mixta | Control manual para grabado de posiciones y control digital para ejecución de secuencias grabadas |
| Tipo: Cobot | |
| Modelo: A_01 | |
| Número de serie: 001 | |
| Versión de software: V 1.0.0 | |
| Método de programación: Programación manual | |
| Lugar de pruebas: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE | |
| Condiciones ambientales | Temperatura: 22.3 °C |
| Tiempo de mediciones: 2.45 horas | |
| Observaciones: | |
| Las pruebas se realizan con los siguientes instrumentos: | |
| <ul style="list-style-type: none"> • plano físico de localización • Probeta de marcado de posición • Actuador tipo Tenaza cara plana | |
| Ensayos realizados según norma ISO9283 | |
| X | Precisión de distancia |
| X | Repetibilidad de distancia |

La precisión de la distancia está determinada por los factores de posicionamiento y la precisión de la distancia de exactitud. Se calcula de la siguiente manera.

$$AD_p = \bar{D} - D_c \quad (24)$$

Donde:

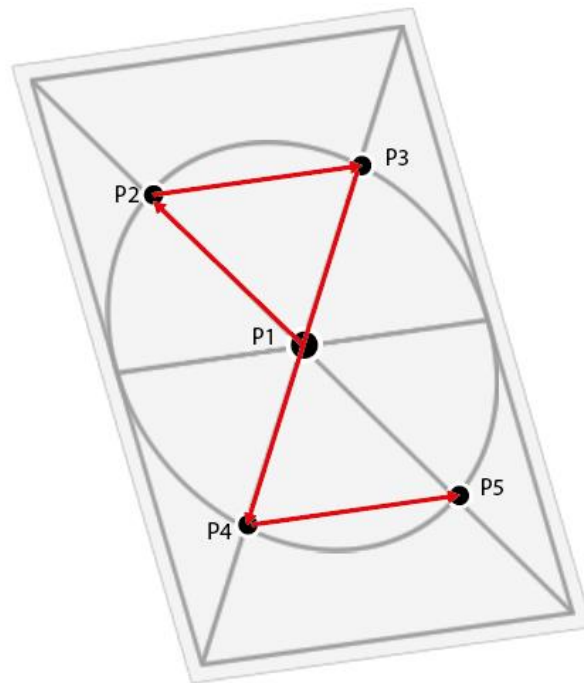
\bar{D} : Distancia media alcanzada

D_c : Distancia de comando

El cobot está programado para moverse sucesivamente por los puntos P1 a P5. Véase figura 53, las medidas se tomarán unidireccionalmente, evaluando 30 ciclos.

Figura 53

Recorrido de posiciones por ciclo



Resultados de prueba de precisión de distancia

A continuación, se detallan las mediciones realizadas en la precisión para las 4 distancias planteadas.

Tabla 11

Resultados Pruebas de precisión y repetibilidad de distancia

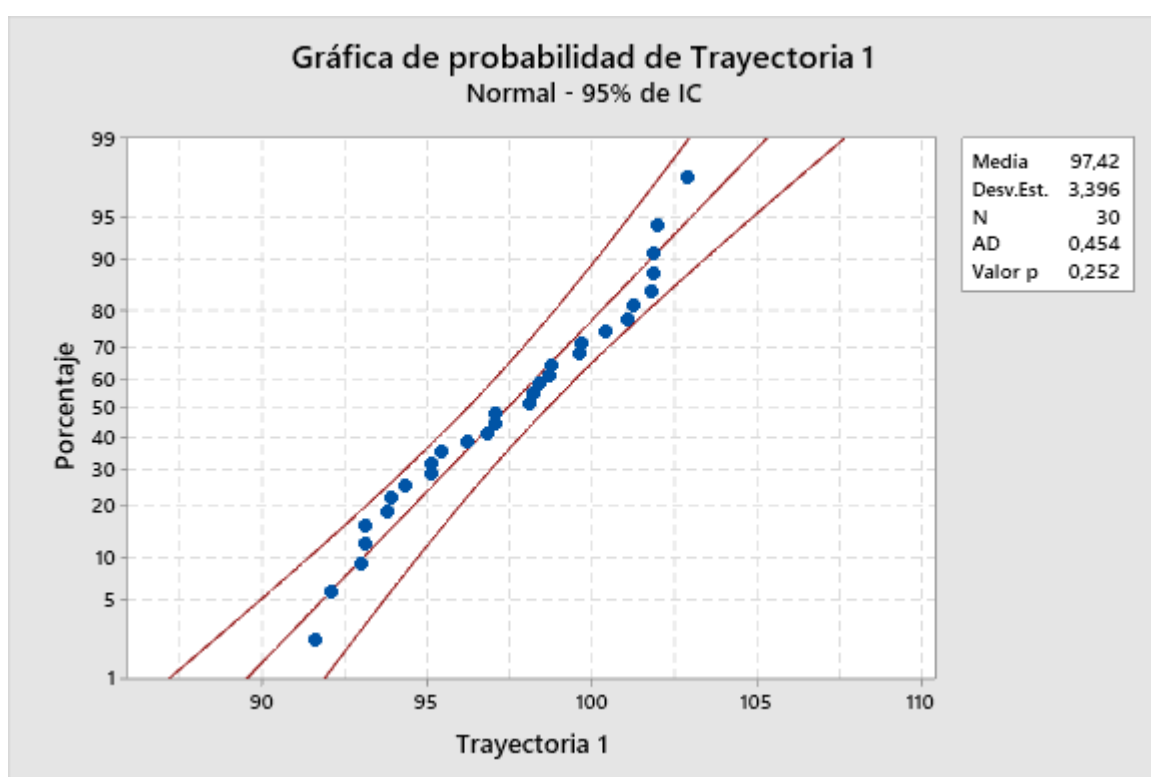
| N° Ciclos | \overline{D}_1 [mm] | D_{e1} [mm] | \overline{D}_2 [mm] | D_{e2} [mm] | \overline{D}_3 [mm] | D_{e3} [mm] | \overline{D}_4 [mm] | D_{e4} [mm] |
|-------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| 1 | 99,7 | 97 | 113,3 | 110,7 | 192,6 | 194 | 99,9 | 97 |
| 2 | 101,9 | 97 | 116,2 | 110,7 | 195,5 | 194 | 96,1 | 97 |
| 3 | 96,8 | 97 | 108,2 | 110,7 | 198,8 | 194 | 99,9 | 97 |
| 4 | 95,4 | 97 | 108,3 | 110,7 | 196 | 194 | 94,7 | 97 |
| 5 | 98,7 | 97 | 116,5 | 110,7 | 198,1 | 194 | 99,1 | 97 |
| 6 | 97,1 | 97 | 109,9 | 110,7 | 192,3 | 194 | 96,7 | 97 |
| 7 | 93,1 | 97 | 108,3 | 110,7 | 195,9 | 194 | 99 | 97 |
| 8 | 98,8 | 97 | 112,1 | 110,7 | 195 | 194 | 97,4 | 97 |
| 9 | 101,8 | 97 | 115,8 | 110,7 | 198 | 194 | 99,7 | 97 |
| 10 | 101,9 | 97 | 115,2 | 110,7 | 196,3 | 194 | 98,9 | 97 |
| 11 | 98,1 | 97 | 109,5 | 110,7 | 197,2 | 194 | 101,1 | 97 |
| 12 | 95,1 | 97 | 110,7 | 110,7 | 198,6 | 194 | 101,5 | 97 |
| 13 | 98,2 | 97 | 109,4 | 110,7 | 198,4 | 194 | 95,2 | 97 |
| 14 | 93,9 | 97 | 114,1 | 110,7 | 193 | 194 | 99,2 | 97 |
| 15 | 101,3 | 97 | 111 | 110,7 | 194,9 | 194 | 93,4 | 97 |
| 16 | 102,9 | 97 | 116,1 | 110,7 | 197 | 194 | 96,1 | 97 |
| 17 | 94,3 | 97 | 108,4 | 110,7 | 197,8 | 194 | 94,5 | 97 |
| 18 | 99,6 | 97 | 107,2 | 110,7 | 194,3 | 194 | 101,1 | 97 |
| 19 | 91,6 | 97 | 106,9 | 110,7 | 192,2 | 194 | 94 | 97 |
| 20 | 92,1 | 97 | 105,7 | 110,7 | 190,8 | 194 | 94,4 | 97 |
| 21 | 93,1 | 97 | 114,6 | 110,7 | 190,9 | 194 | 97,4 | 97 |
| 22 | 102 | 97 | 111,3 | 110,7 | 197 | 194 | 99,2 | 97 |
| 23 | 93 | 97 | 112,9 | 110,7 | 196,4 | 194 | 97,6 | 97 |
| 24 | 98,4 | 97 | 107,4 | 110,7 | 192,7 | 194 | 93,4 | 97 |
| 25 | 100,4 | 97 | 112,3 | 110,7 | 192,8 | 194 | 99,3 | 97 |
| 26 | 93,8 | 97 | 112,7 | 110,7 | 197,4 | 194 | 96,1 | 97 |
| 27 | 97,1 | 97 | 114,2 | 110,7 | 195,6 | 194 | 99 | 97 |
| 28 | 101,1 | 97 | 114 | 110,7 | 195,3 | 194 | 99,8 | 97 |
| 29 | 96,2 | 97 | 111,6 | 110,7 | 191,7 | 194 | 99,3 | 97 |
| 30 | 95,1 | 97 | 108 | 110,7 | 195,4 | 194 | 93,9 | 97 |
| Promedio \overline{D} | 97,41666667 | 97 | 111,39333333 | 110,7 | 195,26333333 | 194 | 97,56333333 | 97 |
| Máximo D_{max} | 102,9 | 97 | 116,5 | 110,7 | 198,8 | 194 | 101,5 | 97 |
| Mínimo D_{min} | 91,6 | 97 | 105,7 | 110,7 | 190,8 | 194 | 93,4 | 97 |
| Dist. AD_p | 0,416666667 | | 0,693333333 | | 1,263333333 | | 0,563333333 | |
| Dist. Max $AD_{p max}$ | 5,9 | | 5,8 | | 4,8 | | 4,5 | |
| Dist. Min $AD_{p min}$ | 5,4 | | 5 | | 3,2 | | 3,6 | |

Resultados de precisión para trayectoria P1 hacia P2

Para la primera trayectoria, la distancia promedio fue de 97.4 mm, conforme la fórmula de la ecuación 24, se tiene un error de 0.4 mm en la distancia recorrida. A continuación, en la figura 54 se muestra el análisis de normalidad de datos apoyados en el planteamiento de la hipótesis nula con un nivel de significancia del 95%.

Figura 54

Análisis de probabilidad en trayectoria 1 realizado en Minitab



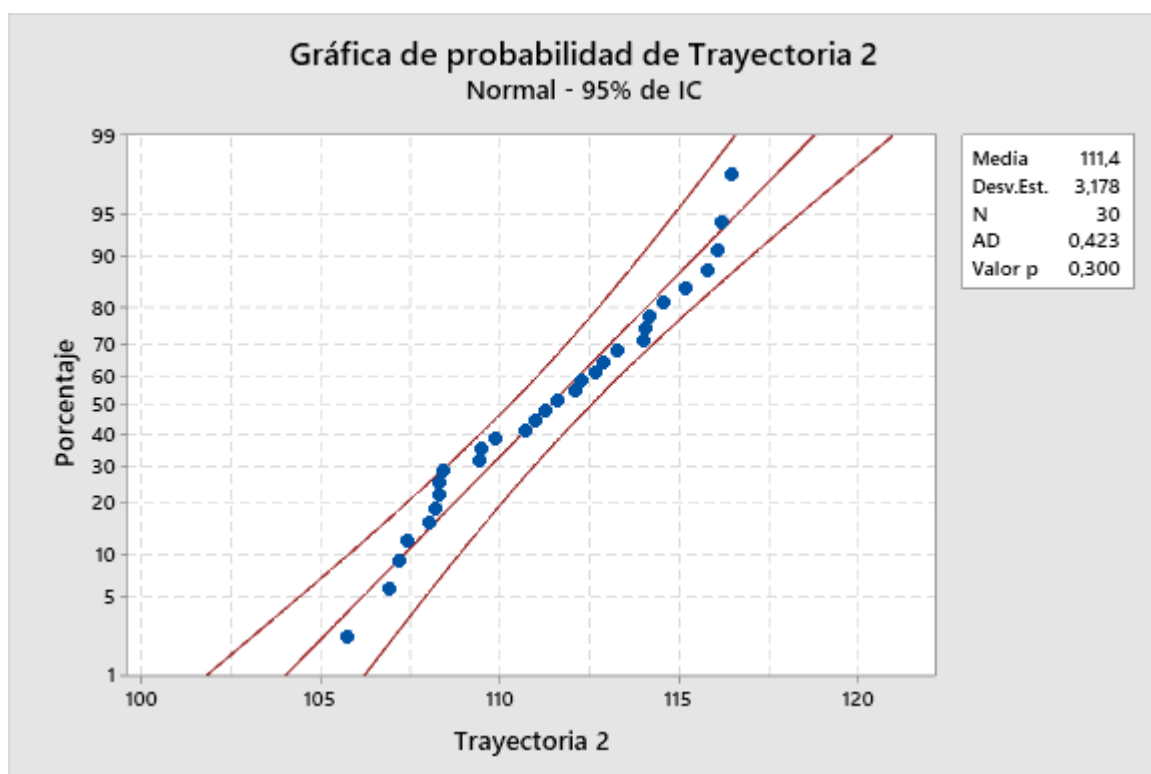
El valor $p = 0.252$ es superior a 0.05 demostrando que las variaciones en las mediciones realizadas son no significativas, demostrando un comportamiento lineal y una distribución normal en el proceso.

Resultados de precisión para trayectoria P2 hacia P3

Para la segunda trayectoria, la distancia promedio fue de 111.4 mm, conforme la fórmula de la ecuación 24, se tiene un error de 0.7 mm en la distancia recorrida. A continuación, en la figura 55 se muestra el análisis de normalidad de datos apoyados en el planteamiento de la hipótesis nula con un nivel de significancia del 95%.

Figura 55

Análisis de probabilidad en trayectoria 2 realizado en Minitab



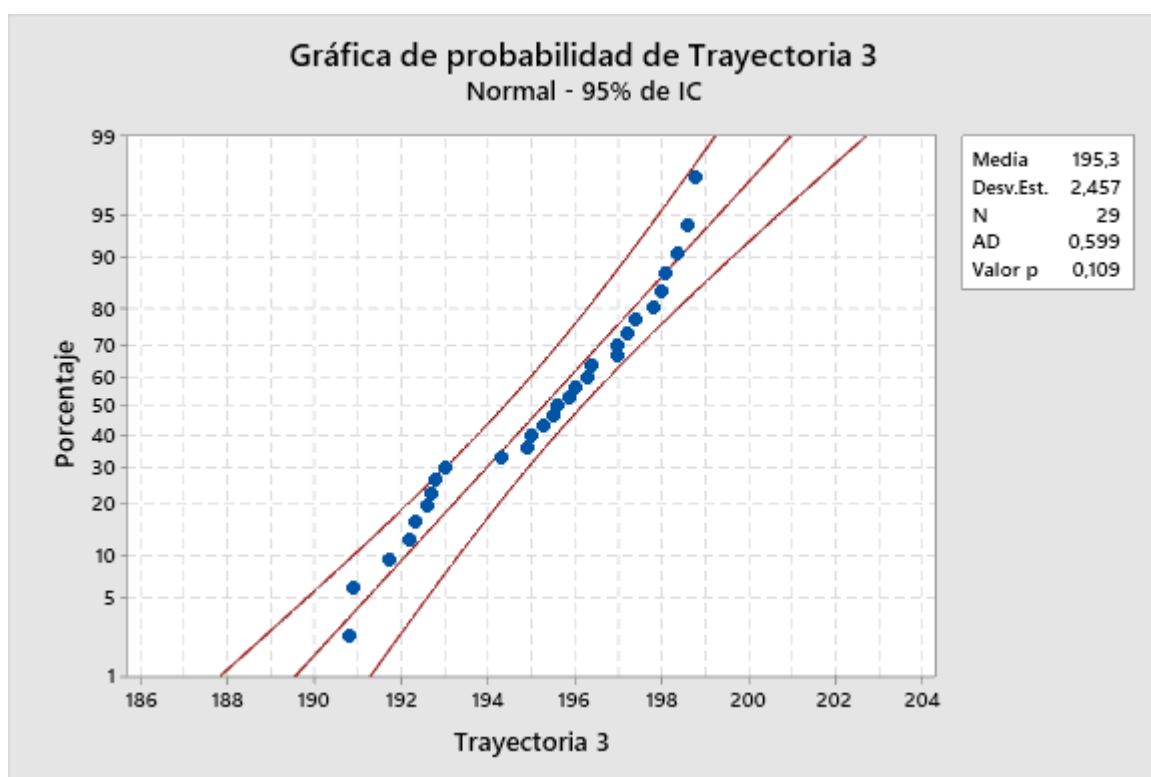
El valor $p = 0.3$ es superior a 0.05 demostrando que las variaciones en las mediciones realizadas son no significativas, demostrando un comportamiento lineal y una distribución normal en el proceso.

Resultados de precisión para trayectoria P3 hacia P4

Para la tercera trayectoria, la distancia promedio fue de 195.3 mm, conforme la fórmula de la ecuación 24, se tiene un error de 1.3 mm en la distancia recorrida. A continuación, en la figura 56 se muestra el análisis de normalidad de datos apoyados en el planteamiento de la hipótesis nula con un nivel de significancia del 95%.

Figura 56

Análisis de probabilidad en trayectoria 3 realizado en Minitab



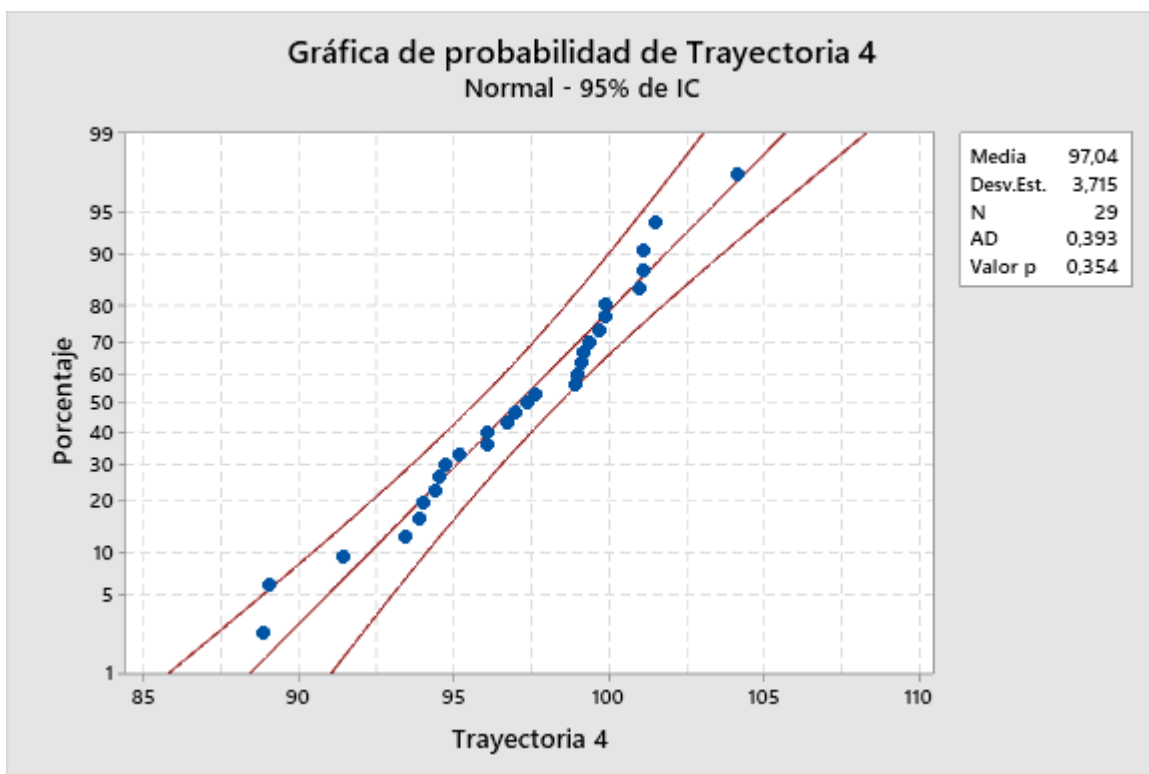
El valor $p = 0.109$ es superior a 0.05 demostrando que las variaciones en las mediciones realizadas son no significativas, demostrando un comportamiento lineal y una distribución normal en el proceso.

Resultados de precisión para trayectoria P4 hacia P5

Para la cuarta trayectoria, la distancia promedio fue de 95.6 mm, conforme la fórmula de la ecuación 24, se tiene un error de 1.4 mm en la distancia recorrida. A continuación, en la figura 57 se muestra el análisis de normalidad de datos apoyados en el planteamiento de la hipótesis nula con un nivel de significancia del 95%.

Figura 57

Análisis de probabilidad en trayectoria 1 realizado en Minitab



El valor $p = 0.354$ es superior a 0.05 demostrando que las variaciones en las mediciones realizadas son no significativas, demostrando un comportamiento lineal y una distribución normal en el proceso.

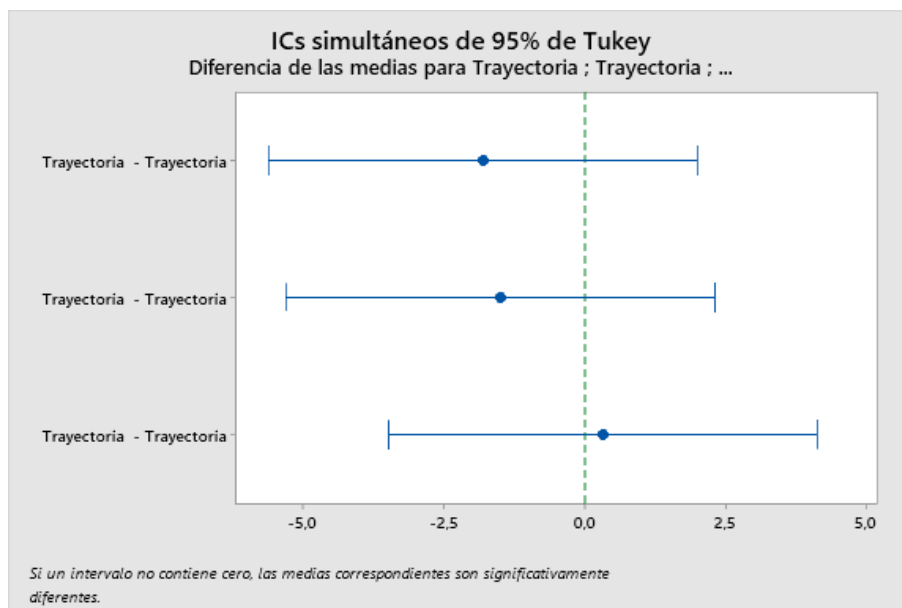
Resultados de prueba de repetibilidad de distancia

Como se enuncia en el literal 6.10 de la norma (ISO 9283, 1998) en el procedimiento, las pruebas de precisión y repetibilidad se pueden realizar en paralelo, para determinar la permanencia de la medición. Con este antecedente se separó las muestras tomadas para las 4 trayectorias en 3 grupos (A, B, C) de 10 mediciones cada una y se realizó un estudio completo de ANOVA para determinar, mediante la estadística F la varianza de cada grupo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

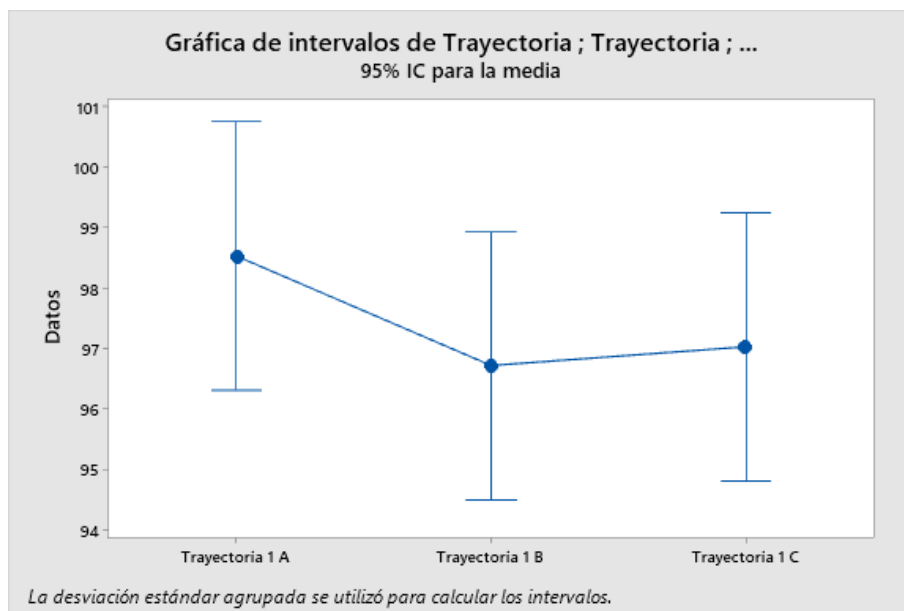
Resultados de repetibilidad para trayectoria P1 hacia P2

Figura 58

Resultados repetibilidad trayectoria 1 a) Método de Tukey, b) Intervalos de confianza



a)

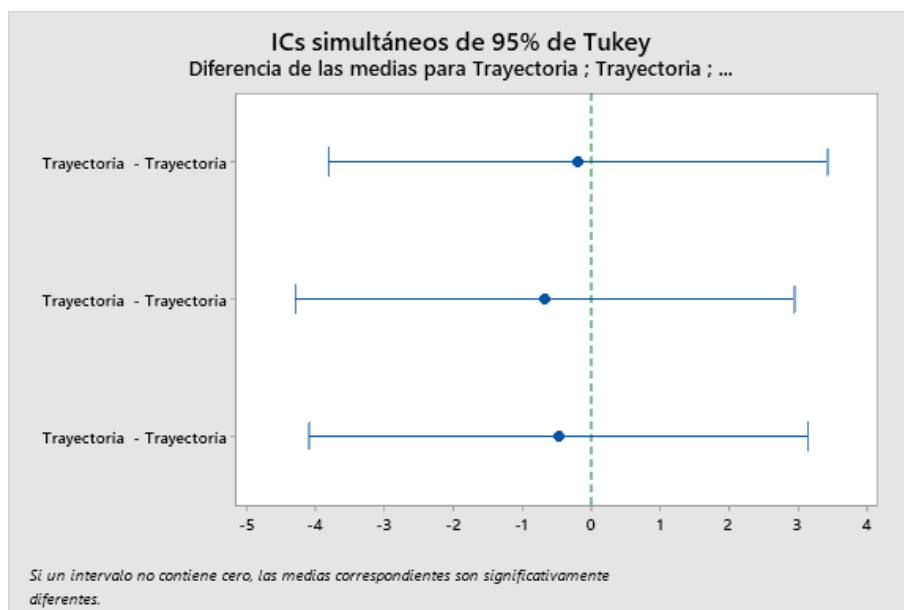


b)

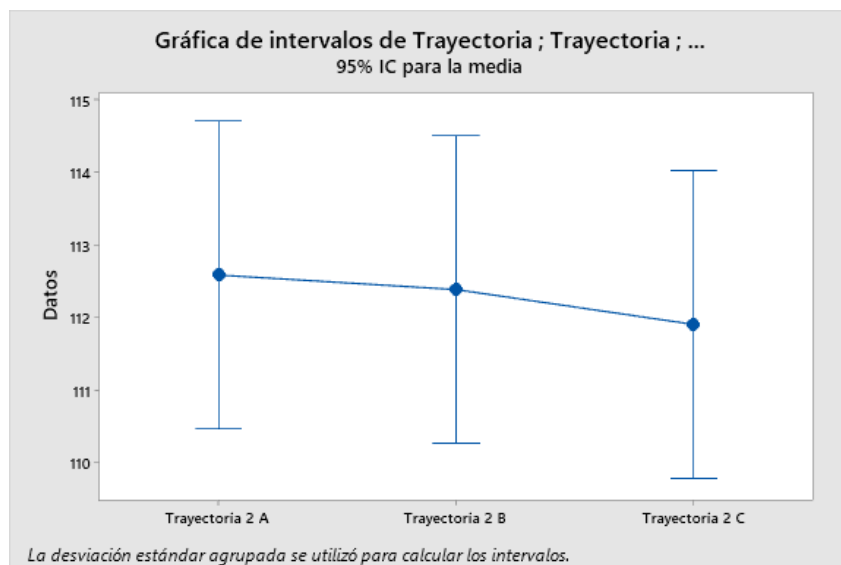
Resultados de repetibilidad para trayectoria P2 hacia P3}

Figura 59

Resultados repetibilidad trayectoria 2 a) Método de Tukey, b) Intervalos de confianza



a)

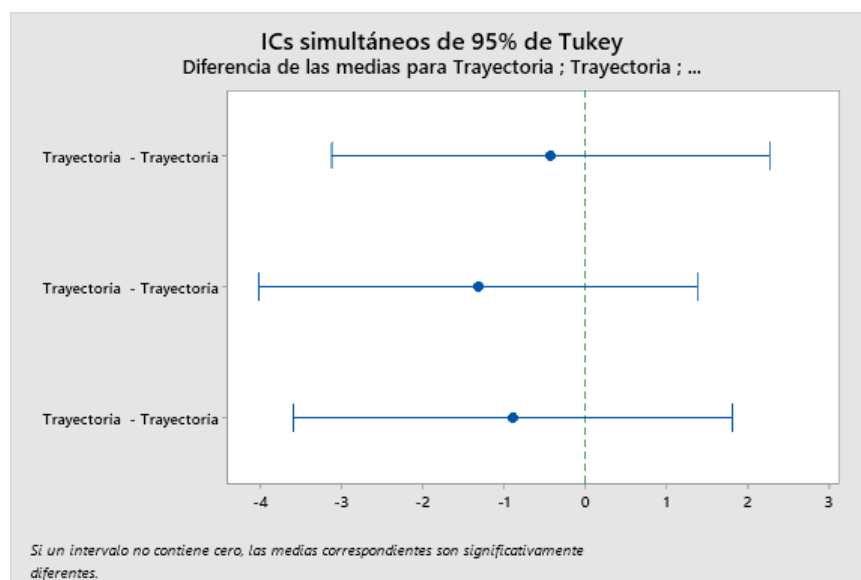


b)

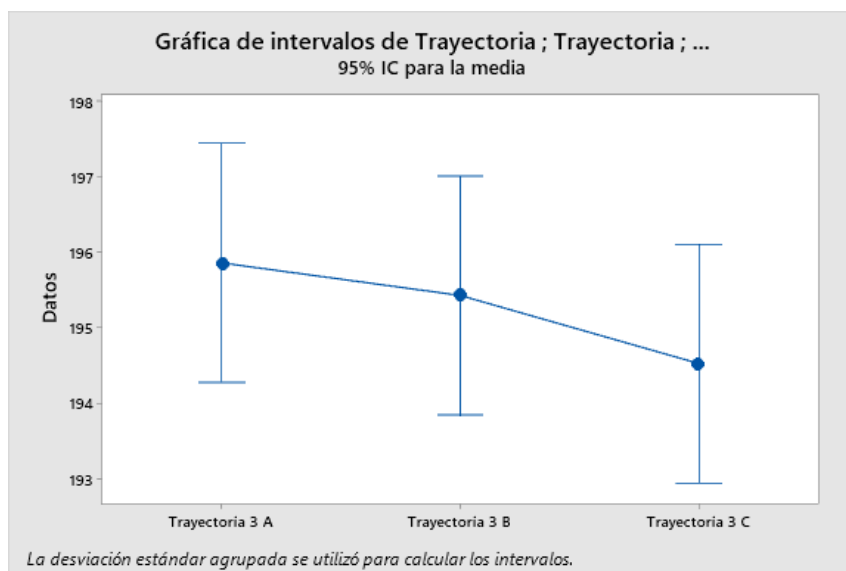
Resultados de repetibilidad para trayectoria P3 hacia P4

Figura 60

Resultados repetibilidad trayectoria 2 a) Método de Tukey, b) Intervalos de confianza



a)

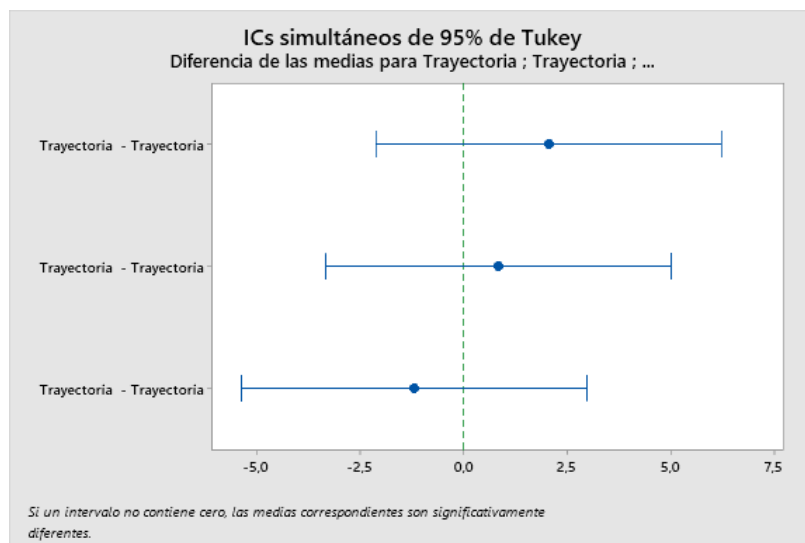


b)

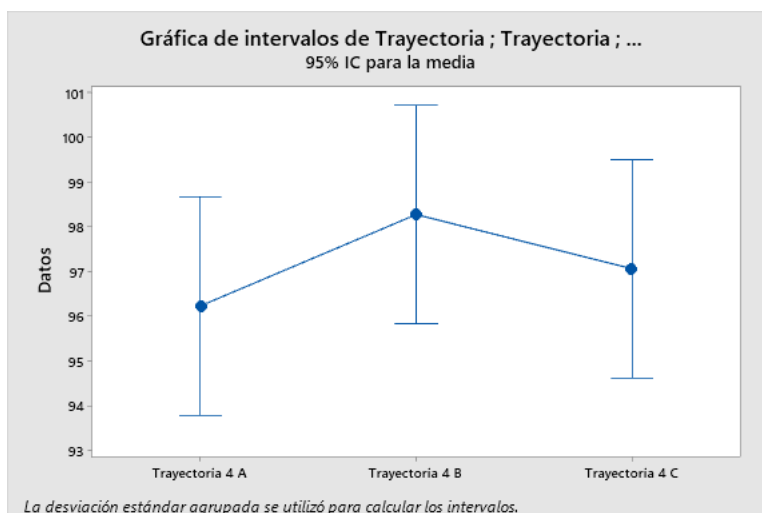
Resultados de repetibilidad para trayectoria P4 hacia P5

Figura 61

Resultados repetibilidad trayectoria 2 a) Método de Tukey, b) Intervalos de confianza



a)



b)

Los resultados en las 4 trayectorias en el apartado del análisis de confianza de Tukey muestran la existencia de la línea de referencia 0, demostrando que los grupos (A, B, C) no presentan diferencias significativas. Reforzando el análisis, por medio de la gráfica de intervalos de trayectoria de Fisher para todas las trayectorias, se ha hallado intersección entre los rangos hallados, demostrando que cada grupo es equivalente.

El grado de aceptabilidad de repetibilidad es evaluado por la guía de control estadístico de calidad y seis sigma (Gutierrez, Roman, 2009), donde se menciona el criterio de calificación para un proceso evaluado. Véase Tabla11.

Tabla 12

Criterio de aceptabilidad para prueba de repetibilidad seis sigma

| Criterio de aceptación | |
|------------------------|----------------------------------|
| Abajo de 10 % | Excelente proceso |
| De 10 a 20 % | Bueno, aceptable |
| De 20 a 30 % | Marginalmente aceptable |
| Arriba de 30 % | Inaceptable y debe ser corregido |

Los resultados para las 4 trayectorias planteadas son los siguientes:

Tabla 13

Porcentaje de repetibilidad para cuatro trayectorias

| Porcentaje de Repetibilidad | |
|------------------------------------|---------|
| Primera trayectoria | 14.92 % |
| Segunda trayectoria | 14.24 % |
| Tercera trayectoria | 10.68 % |
| Cuarta trayectoria | 12.19 % |

Resumen

El capítulo 4 recopiló una guía de conexión y funcionamiento en sus dos modos de trabajo: ejecución y grabado de nuevas secuencias, dichas tareas se estructuran por medio de arrays, con la capacidad de configurar la velocidad de trabajo y el tiempo de esperar entre posiciones, adicionalmente se complementó la guía con controles de pausa y paro de emergencia, cuando el cobot se encuentra en movimiento. Todo esto orientado para la facilidad de uso por parte del usuario, priorizando su integridad personal.

Se describe la evaluación del cobot mediante la norma ISO 9883. El alcance de la evaluación se compone de dos ítems de valoración: precisión de distancia y repetibilidad de distancia. Para esto, se utilizó un tablero de evaluación y se siguió el procedimiento de la guía. Se realizaron treinta mediciones en cinco puntos diferentes, registrando las distancias obtenidas y procediendo con los estudios planteados.

Los resultados obtenidos para los cinco puntos estudiados demuestran un comportamiento con tendencia normal y un alto coeficiente de correlación. Mediante el análisis de probabilidad de trayectoria,

se acepta la hipótesis nula dentro del control estadístico, lo cual demuestra que las variaciones en las lecturas registradas no son significativas.

Dentro del análisis de repetibilidad, sustentado bajo la guía estadística de seis sigma, se obtuvo un porcentaje de repetibilidad entre el 10 % y el 20 %, lo que corresponde a un desempeño bueno y aceptable.

Capítulo 5

Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

Conclusiones

- Se diseñó y construyó un prototipo de robot colaborativo de 4 grados de libertad, capaz de ejecutar y guardar secuencias de trabajo, por medio de un sistema de guiado manual, con respecto al grabado convencional de instrucciones, el cobot desarrollado no demanda de experiencia previa del usuario en cuanto a programación, permitiendo mover cada articulación y guardar el progreso paso a paso, al finalizar el grabado, los cambios de posición forman parte de una colección de instrucciones, que el cobot interpreta como una nueva secuencia de trabajo lista a ser elegida según la necesidad.
- Se dimensionó y seleccionó servomotores capaces de mover el cobot, con suficiente potencia y precisión para garantizar un desempeño óptimo en cada operación realizada. Por medio de cálculos de cinemática y dinámica del equipo se comprueba la eficacia de los actuadores elegidos, que gracias a su torque de 35 kgf.cm, no solo permite cumplir las expectativas de funcionamiento, también brinda la seguridad de incrementar las prestaciones del equipo con piezas modulares en su actuador final,
- Se implementó un sistema de grabado cómodo e intuitivo por medio de encoders absolutos, permitiendo al usuario girar las perillas correspondientes a cada motor y ver en tiempo real el cambio de posición en cada articulación, este principio de grabado aporta un mayor control en la trayectoria y un mejor ajuste de precisión, además de observar de manera digital en el software de control y monitoreo los grados que ha girado cada eje, se incorpora una pantalla led con instrucciones de grabado para comodidad del usuario.

- Se incorporó una interfaz multiplataforma para el control y monitoreo en tiempo real del cobot, capaz de comunicarse con el sistema operativo ROS, la plataforma puede soportar conexiones simultáneas, gestionar el envío de señales, controlar la velocidad, ejecutar paros en la trayectoria del equipo físico y simular la trayectoria programada con un gemelo digital, el cual puede ser inspeccionado en tres dimensiones en todo momento por el o los usuarios conectados.
- Se realizó la validación del cobot por medio de la norma ISO 9283, guía que establece criterios de análisis de prestaciones y métodos de ensayos relacionado con equipos robóticos. Los ítems de valoración son: precisión de distancia y repetibilidad de distancia. En cada uno de ellos se obtiene resultados satisfactorios, en base a datos recolectados de 5 puntos evaluados con treinta mediciones cada uno. Dentro del primer estudio por medio del análisis estadístico de normalidad se halla uniformidad y linealidad en las lecturas registradas con un porcentaje de confiabilidad del 95% se acepta la hipótesis nula, la cual concluye que las variaciones registradas en el conjunto de datos no son significativas. Dentro del segundo análisis de repetibilidad apoyados en la guía estadística seis sigma se determina un porcentaje de repetibilidad entre el 10 % y el 20 %, que corresponde a un desempeño bueno y aceptable.

Recomendaciones

- Se recomienda ampliar los grados de libertad del cobot para tener una mayor flexibilidad en sus movimientos, por medio de desacople cinemático, el equipo puede realizar acciones de transporte de piezas considerando distancia y orientación.
- Se recomienda usar el modo de grabado para simular las trayectorias y familiarizarse con el funcionamiento tanto de la interfaz como del cobot físico, una vez comprendido la funcionalidad de los comandos de pausas y velocidad de ejecución, el usuario debe ubicar el cobot en una superficie estable y libre de elementos que puedan interrumpir el desempeño del equipo.

- Los servomotores del cobot funcionan a voltios DC, la fuente de alimentación original suministra la potencia necesaria para mover todo el equipo, en caso de cambiarla o repotenciarla se recomienda realizar un adecuado dimensionamiento y planilla de consumo energético.
- Debido a que el cobot funciona con sistema operativo ROS, para ejecutar la interfaz de monitoreo y control, se recomienda usar un computador con los siguientes requisitos mínimos: Procesador core i5 de 6ta generación o su equivalente, memoria ram de 8GBs, tarjeta gráfica incorporada al computador y una conexión de red estable con velocidad mínima de 2 Mbps.
- Para el apartado de grabado, recomienda optimizar las trayectorias, estableciendo variaciones de posiciones en más de un actuador a la vez, salvo en las acciones en sujeción o liberación de la pieza que se esté trasladando. El usuario debe tomar en cuenta que la creación de más puntos de grabado significa un mayor tiempo de ejecución en la trayectoria total.

Trabajos futuros

- Diseñar y construir un cobot de 6 grados de libertad con desacople cinemático y control independiente de cada articulación, con un modo de grabado orientado a la enseñanza de robótica con simulación de movimiento bajo sistema operativo ROS.
- Implementar un sistema de seguridad basado en visión artificial que coordine la ejecución de movimientos, dependiendo de la cercanía de objetos o personas, variando su velocidad y torque.

Bibliografía

ABB. (s.f). *ABB*. Obtenido de YuMi - IRB 14000 | Robot Colaborativo:

<https://library.e.abb.com/public/0236bf1e2983477db86fe424e45b1134/Data%20sheet%20ES.pdf>

Compunixec. (2015). *Compunixec*. Obtenido de Mini Fuente de Poder Quasad:

<https://compunixec.com/producto/mini-fuente-de-poder-quasad-650w-12v-20a-sata-slim-micro-atx/>

Control, M. (2018). *Motion Control*. Obtenido de Servo motor torque curves: What you need to know:

<https://www.motioncontroltips.com/servo-motor-torque-curve/>

Cranes, T. (2003). *Cranes Today*. Obtenido de STANLEY MOVES INTO MATERIALS HANDLING WITH

COBOTICS ACQUISITION: <https://www.cranestodaymagazine.com/news/stanley-moves-into-materials-handling-with-cobotics-acquisition>

Edwards, D. (24 de 05 de 2016). *A history of collaborative robots, by Universal Robots*. Obtenido de

Robotics and automation news: <https://roboticsandautomationnews.com/2016/05/24/a-history-of-collaborative-robots-by-universal-robots/4684/>

El osciloscopio. (sf). *El osciloscopio*. Obtenido de Comparación de Arduino vs ESP8266 vs ESP32:

<https://elosciloscopio.com/comparacion-arduino-vs-esp8266-vs-esp32/>

El Universo. (15 de 11 de 2021). *Los cobots se abren paso en la industria gracias a su capacidad*

tecnológica y versatilidad. Obtenido de Los cobots se abren paso en la industria gracias a su

capacidad tecnológica y versatilidad: [https://www.eluniverso.com/larevista/tecnologia/los-](https://www.eluniverso.com/larevista/tecnologia/los-cobots-se-abren-paso-en-la-industria-gracias-a-su-capacidad-tecnologica-y-versatilidad-nota/)

[cobots-se-abren-paso-en-la-industria-gracias-a-su-capacidad-tecnologica-y-versatilidad-nota/](https://www.eluniverso.com/larevista/tecnologia/los-cobots-se-abren-paso-en-la-industria-gracias-a-su-capacidad-tecnologica-y-versatilidad-nota/)

- FAIM. (24 de 06 de 2019). *Experiences and expectations of collaborative robots in industry and academia: barriers and development needs*. Obtenido de FAIM: www.sciencedirect
- FANUC. (s.f). *FANUC*. Obtenido de FANUC ROBOT COLABORATIVO CR-35IA:
<https://www.fanuc.eu/es/es/robots/p%C3%A1gina-filtro-robots/%D1%80obots-colaborativos/robot-colaborativo-cr35ia>
- Frohm, J. L. (2008). *Frohm, J., Lindström, V., Stahre, J., Winroth, M.* Obtenido de Levels of automation in manufacturing.: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:216233/FULLTEXT01.pdf>
- Groover, M. P. (2008). *Automation, production System and Computer Integrated manufacturing*. Pearson.
- GT Engineering. (22 de mayo de 2023). *GT Engineering*. Obtenido de Safety in Collaborative Robotics:
<https://www.gt-engineering.it/en/insights/machinery-safety/safety-in-collaborative-robotics/>
- Gutierrez, Roman. (2009). *Control Estadístico de calidad y seis sigma*. Mexico: Mc Grw Hill.
- Inovativa Intergración. (diciembre de 2022). *Inovativa Intergración*. Obtenido de Cobots Versus Robots – Ventajas y Desventajas: <https://integracion.innovantia.es/cobots-frente-a-robots-ventajas-y-desventajas/>
- ISO 9283. (1998). *Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods*. Switzerland: International Organization for Standardization.
- J. Edward Colgate, W. W. (1996). *Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators*. Obtenido de peshkin.mech.northwestern.edu:
https://peshkin.mech.northwestern.edu/publications/1996_Colgate_CobotsRobotsCollaboration.pdf
- Park. F.C, L. K. (2016). *INTRODUCTION TO ROBOTICS MECHANICS, PLANNING, AND CONTROL*.

Reyes Cortes, F. (2011). *Robótica: Control de robots manipuladores*. Alfaomega.

RIA. (2018). *RIA*. Obtenido de Actualización del mercado de robots colaborativos :

<https://www.automate.org/blogs/collaborative-robots-market-update-2018>

Robots Didácticos. (s.f). *Robots Didácticos*. Obtenido de Módulo codificador rotativo KY-040 [ó KY-007] –

(Kit de sensores Keyes 040/007): <https://robots-argentina.com.ar/didactica/modulo-codificador-rotativo-ky-040-o-ky-007-kit-de-sensores-keyes-040-007/>

Ulrich, K. &. (2012). *Diseño y desarrollo de productos*. Mexico: Mc Graw Hill.

Universal Robots. (2017). *Universal Robots*. Obtenido de Automation for anyone. Anywhere:

<https://www.universal-robots.com/>

Universal robots. (2022). *Universal robots*. Obtenido de Universal robots: [https://www.universal-](https://www.universal-robots.com/es/productos/)

[robots.com/es/productos/](https://www.universal-robots.com/es/productos/)

Apéndices