

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Control de dron con brazo robótico para la distribución de insumos médicos en
zonas remotas

INGE-2622

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

Luis Mario Arroba Vásquez

Favia Milena Elizalde Aristeguieta

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi familia, por ser el pilar fundamental que me ha sostenido con amor incondicional y constante aliento. Cada palabra de apoyo y cada gesto de comprensión han sido el faro que me ha guiado en cada etapa de este desafiante viaje. A mis profesores, compañeros y amigos, cuyas enseñanzas y dedicación han sido la brújula que orientó mi formación profesional. Sus consejos, paciencia y compromiso han sido cruciales para alcanzar mis metas y superar los obstáculos.

- Luis Mario Arroba Vásquez

Dedicatoria

Dedico esta tesis a Dios y a la Santísima Virgen María, quienes me han regalado la gracia de formarme profesionalmente; a mis padres, cuyo apoyo incondicional a lo largo de los años ha sido fundamental para que pueda alcanzar todas mis metas, especialmente a mi madre, pues han sido sus consejos, guía y amor los que me han motivado a seguir adelante todos los días.

- Favia Milena Elizalde Aristeguieta

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios y a mi familia, cuyo apoyo incondicional ha sido crucial en cada etapa de este camino. A pesar de todas las caídas, siempre han estado a mi lado para ayudarme a levantarme y seguir adelante. En especial, quiero destacar a mi hermana, cuya participación en el proyecto fue destacada.

A mis hermanos de otra madre, nuestro apoyo en conjunto en las trincheras de cada salón de clase, ha hecho que este trayecto sea mucho más llevadero y significativo.

Y, finalmente, a mi tutor y maestro, que no solo compartió su vasto conocimiento y experiencia, sino que también nos brindó la confianza necesaria para concretar esta iniciativa. Su orientación y fe en nuestras capacidades han sido una fuente invaluable de motivación.

- Luis Mario ArrobaVásquez

Agradecimientos

¡Deo Gratias!

Le doy gracias a Dios y a la Santísima Virgen María por todas las bendiciones recibidas a lo largo de estos años.

Agradezco a mi familia por ser mi apoyo incondicional en todo momento; mi padre Favio Elizalde me ha enseñado que el estudio debe ser acompañado con dedicación, disciplina y honestidad, mi madre Mia Aristeguieta me ha ayudado a no rendirme en los momentos difíciles, y mis hermanas Valentina y Valeska Elizalde me han inspirado a ser mejor cada día.

Agradezco también a todas las personas que, con sus oraciones, me han ayudado a alcanzar esta meta, especialmente, quiero agradecer a Miguel Tomalá porque su apoyo me ha sido fundamental en este camino.

- Favia Milena Elizalde Aristeguieta

Declaración Expresa

Nosotros *Luis Mario Arroba Vásquez y Favia Milena Elizalde Aristeguieta* acordamos y reconocemos que la titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, información no divulgada y cualquier otro derecho o tipo de Propiedad Intelectual que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada durante el desarrollo de su trabajo de titulación, incluyendo cualquier derecho de participación de beneficios o de valor sobre titularidad de derechos, pertenecerán de forma total, perpetua, exclusiva e indivisible a LA ESPOL, sin limitación de ningún tipo. Se deja además expresa constancia de que lo aquí establecido constituye un “previo acuerdo”, así como de ser posible bajo la normativa vigente de transferencia o cesión a favor de la ESPOL de todo derecho o porcentaje de titularidad que pueda existir.

Sin perjuicio de lo anterior los alumnos firmantes de la presente declaración reciben en este acto una licencia de uso gratuita e intransferible de plazo indefinido para el uso no comercial de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada durante el desarrollo de su trabajo de titulación, sin perjuicio de lo cual deberán contar con una autorización previa expresa de la ESPOL para difundir públicamente el contenido de la investigación, desarrollo tecnológico o invención.

Así también autorizamos expresamente a que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra o invento, por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual.

Guayaquil, 10 de septiembre del 2024.



Luis Mario Arroba
Vásquez



Favia Milena Elizalde
Aristeguieta

Evaluadores

Jorge Hurel Ezeta, Ph.D.

Profesor de Materia

Francisco Yumbla Arevalo, Ph.D.

Tutor de proyecto

Resumen

Ecuador, con su diversa geografía, enfrenta desastres naturales frecuentes que complican la gestión de suministros médicos durante emergencias. Para resolver este problema, desarrollamos un brazo robótico compacto con dos grados de libertad, diseñado para drones de tamaño mediano, mejorando así el transporte de insumos médicos a áreas de difícil acceso.

Este brazo, controlado por ROS Noetic y una Raspberry Pi, emplea un controlador híbrido que combina métodos basados en esfuerzo y posición, reduciendo el margen de error a un 2%. El prototipo cuenta con un sistema de transmisión de potencia con engranajes y correas sincrónicas para distribuir la potencia desde una sola fuente hacia cada uno de los dedos de la garra universal, junto con mecanismos de tornillo sin fin para poder definir la posición deseada del brazo robótico. Para su implementación, se emplearon diversas técnicas y materiales propios de la manufactura aditiva para crear un agarre robusto y adaptable.

Además, se desarrolló una aplicación que permite controlar simultáneamente múltiples drones y brazos robóticos mediante una interfaz intuitiva basada en ArduPilot. Esta capacidad de coordinación avanzada mejora significativamente la eficacia en operaciones de rescate y gestión de suministros médicos, ofreciendo una solución efectiva para los desafíos de emergencia en Ecuador.

Palabras Clave: ROS Noetic, manufactura aditiva, agarre, transporte.

Abstract

Ecuador, with its diverse geography, faces frequent natural disasters that severely complicate the management and delivery of medical supplies during emergencies. To tackle this pressing issue, we developed a compact robotic arm with two degrees of freedom, specifically designed for medium-sized drones. This solution enhances the transportation of medical supplies to hard-to-reach areas during crises.

Controlled by ROS Noetic and a Raspberry Pi, the robotic arm features a hybrid controller that combines effort-based and position-based methods, achieving remarkable precision with an error margin reduced to just 2%. The prototype is equipped with a power transmission system utilizing gears and synchronous belts, effectively channeling power from a single source to each finger of the universal gripper. Various additive manufacturing techniques and materials were utilized to create a robust and adaptable grip, significantly improving the arm's functionality and durability. In addition, we developed an application that enables simultaneous control of multiple drones and robotic arms through an intuitive interface based on ArduPilot. This advanced coordination capability greatly enhances rescue operations and the management of medical supplies, offering a highly effective solution to Ecuador's emergency response challenges.

Keywords: ROS Noetic, additive manufacturing, gripping, transportation.

Índice general

Resumen.....	I
Abstract	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas	X
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema.....	3
1.3 Justificación del problema.....	5
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos	6
1.5 Marco teórico	6
1.5.1 Vehículos aéreos no tripulados	6
1.5.2 Manipulación robótica	7
1.5.3 Telemedicina.....	7
1.5.4 Sistema Operativo Robótico (ROS).....	8
1.5.5 Estado del Arte.....	8
Capítulo 2.....	11
2.1 Metodología.	12
2.2 Requerimientos del Diseño	12
2.3 Solución.....	16

2.3.1	Alternativas de Solución	16
2.3.2	Criterios de Selección	18
2.4	Matriz de Decisión	19
2.5	Proceso de Diseño	21
2.6	Diseño Mecánico.....	23
2.6.1	Diseño del brazo robótico	23
2.6.2	Diseño de la garra mecánica	25
2.7	Diseño Electrónico	28
2.7.1	Selección de sensores.....	28
2.8	Diseño de Control.....	31
Capítulo 3.....		34
3.1	Resultados y análisis	35
3.2	Sistema Mecánico	35
3.2.1	Diseño Mecánico del Brazo Robótico	35
3.2.2	Diseño Mecánico de la Garra mecánica.....	38
3.3	Sistema de Control	42
3.3.1	Simulación del modelo para el brazo en Matlab.....	42
3.3.2	Arquitectura de Control y Software.....	43
3.4	Pruebas del modelado.....	44
3.4.1	Pruebas de simulación.....	44
3.4.2	Sistema de Multidrones.....	45
3.5	Pruebas de Equipo Físico	52
3.6	Análisis de Costos	53
Capítulo 4.....		55
4.1	Conclusiones y recomendaciones.....	56

4.1.1	Conclusiones	56
4.1.2	Recomendaciones	58

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
RAMEL	Robotics Automation & Mechatronics Engineering Laboratory
ROS	Robot Operating System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

Simbología

<i>N</i>	.....	Newtons
Ø	.....	Diámetro
R	.....	Radio
GPA	.....	Giga Pascales
MPA	.....	Mega Pascales
m	.....	Metro
cm	.....	Centímetro
mm	.....	Milímetro
Kg	.....	Kilo gramo
gr	.....	gramo
V	.....	Volteos
A	.....	Amperios
RPM	.....	Revoluciones por minuto
su	.....	unidades
Mbps	.....	Megabit por segundo
°C	.....	Grados Celsius
\$	.....	Dólares

Índice de figuras

Figura 1	2
Figura 2	7
Figura 3	9
Figura 4	9
Figura 5	10
Figura 6	22
Figura 7 <i>Servomotor Dynamixel</i>	24
Figura 8 <i>Servomotor MG995</i>	26
Figura 9	27
Figura 10 <i>Batería LiPo</i>	29
Figura 11 <i>Tarjeta U2D2</i>	29
Figura 12 <i>U2D2</i>	30
Figura 13	30
Figura 14	31
Figura 15	36
Figura 16	36
Figura 17	37
Figura 18	37
Figura 19	38
Figura 20	39
Figura 21	40
Figura 22	41
Figura 23	42
Figura 24	42
Figura 25	43
Figura 26	44
Figura 27	45
Figura 28	46
Figura 29	47
Figura 30	48

Figura 31	49
Figura 32	50
Figura 33	51
Figura 34	51
Figura 35	52
Figura 36	65
Figura 37	66

Índice de tablas

Tabla 2.2.1 <i>Requerimientos de diseño del proyecto.</i>	12
Tabla 2.2.2 <i>Componentes requeridos del diseño del proyecto.</i>	14
Tabla 2.3.1 <i>Criterios de evaluación.</i>	19
Tabla 2.4.1 <i>Matriz de decisión para la selección de alternativa.</i>	20
Tabla 2.6.1 <i>Especificaciones del brazo robótico.</i>	23
Tabla 2.6.2 <i>Especificaciones de los servomotores Dynamixel</i>	24
Tabla 2.6.3 <i>Especificaciones del tornillo sin fin.</i>	25
Tabla 2.6.4 <i>Especificaciones de los servomotores MG995</i>	26
Tabla 2.7.1 <i>Especificaciones de la batería LiPo</i>	28
Tabla 2.7.2 <i>Especificaciones de la tarjeta U2D2</i>	29
Tabla 2.7.3 <i>Especificaciones del modelo de comunicación U2D2</i>	30
Tabla 3.6.1 <i>Análisis de Costos.</i>	53

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados o UAV (del inglés unmanned aerial vehicle), también conocidos como drones, han ganado una gran popularidad debido a su versatilidad y facilidad de uso, por eso se están utilizando ampliamente en distintos sectores como lo son el sector topográfico, de emergencias y seguridad, agrario, entre otros, con fines económicos, comerciales, militares y académicos. La industria de los drones ha sido aceptada como modelo para incorporar múltiples tecnologías, gracias a los avances tecnológicos, de control y navegación. El control y la manipulación precisa de drones es muy importante para el acceso a áreas remotas, obtención de imágenes o videos en distintos ángulos, y la captura de datos precisos, así mismo, los drones permiten una aceleración en procesos de monitoreo logrando reducir costos asociados con la mano de obra y los recursos requeridos en métodos tradicionales [1].

La revolución en el ámbito industrial es la creación de una nueva generación de robots aéreos dotados de capacidades de vuelo estacionario con incorporación de brazos robóticos y/o mecánicos dedicados a la manipulación de objetos y realización de tareas que hasta ahora son muy costosas mientras el dron vuela [2], sin embargo, el desarrollo de dichos brazos robóticos orientados a la manipulación aérea sigue siendo un desafío debido a que aumentan de manera considerable la complejidad del sistema.

Figura 1

Un dron capaz de transportar mercancías de la empresa japonesa Prodone [3].



Pese a la gran cantidad de beneficios que nos proporcionan estos sistemas UAV, se ha encontrado ciertas limitaciones en cuanto a la autonomía de vuelo, planificación de rutas, resistencia o duración de baterías, tiempos de vuelos y capacidad de transporte [4]. Como solución a lo mencionado, se usan sensores que logren vuelos más inteligentes y con precisión aumentando la capacidad de control en drones, además de incorporar inteligencia artificial o realidad aumentada, permitiendo desarrollar y ofrecer nuevos servicios.

En este contexto, el presente proyecto busca trabajar en una instalación de investigación y educación ubicada en ESPOL llamada RAMEL, en donde se realizará tanto el diseño como la incorporación de un brazo robótico en dispositivos UAV para el desarrollo de un mecanismo de control y monitoreo en tiempo real que permita el reparto de insumos médicos en zonas remotas o de difícil acceso.

1.2 Descripción del problema

Los desastres naturales, monstruos acechantes de la naturaleza, siempre presentes a los pies de la humanidad; son eventos catastróficos que irrumpen de manera repentina y descontrolada, desatando su furia sobre la población y amenazando tanto su salud como su bienestar, tanto en el momento mismo como en las secuelas que dejan a su paso. Ecuador, al igual que muchos otros países, no ha logrado escapar de las garras de estas fuerzas destructivas, lo que ha resultado en innumerables pérdidas ocasionadas por terremotos, derrumbes, incendios y otras calamidades. Estas pérdidas no se limitan al momento del desastre, sino que se prolongan en el tiempo debido a las diversas complicaciones que surgen posteriormente [5].

Las condiciones ambientales conflictivas en las que se desarrollan estos desastres, los peligros y las dificultades para localizar a las personas atrapadas, el aislamiento continuo y la escasez de alimentos y medicamentos, representan solo algunas de las dificultades que enfrentan los pocos

sobrevivientes a estas amenazas. Esto se hizo evidente en eventos como el derrumbe en Alausí o el terremoto en Manabí, donde las complicaciones topográficas generadas por la tragedia dificultaron enormemente las labores de comunicación, interacción y rescate de las personas atrapadas bajo los escombros de sus anteriores hogares [6].

A pesar de contar con diversos protocolos de gestión de desastres naturales en el país, tanto a nivel público como privado, muchas de las acciones emprendidas se vieron obstaculizadas por las complicaciones logísticas y sociales. Distribuir alimentos, equipos y asistencia médica, e incluso mantener la comunicación con familiares en zonas adyacentes, resultó difícil debido a las interrupciones en el suministro eléctrico y lo peligroso del terreno.

Las medidas de respuesta correspondientes a la fase 2 del Plan Nacional de Respuesta ante Desastres Naturales se vieron limitadas por actividades como el saqueo de alimentos, que dificultaron el transporte de recursos vitales a las familias e individuos afectados. Además, numerosas personas no pudieron recibir la ayuda necesaria debido a las complicaciones y peligros asociados con el desplazamiento de una zona a otra dentro de las áreas afectadas.

Además de estos desafíos, los altos costos asociados con el transporte de equipo pesado durante el período de búsqueda y rescate de los supervivientes, así como el transporte de medicamentos y recursos básicos a los afectados, representaron una carga significativa. Estos costos podrían ascender hasta \$200 por hora [7].

A partir de estas adversidades, se ha buscado una solución que sea accesible, constante y rápida para superar estos obstáculos y ofrecer ayuda a aquellos que han logrado escapar de las garras de la tragedia y buscan *una mano amiga, una nueva esperanza, una mano robótica*. Se ha explorado el potencial de los dispositivos UAV, aprovechando las ventajas de la visión por computadora y los avances tecnológicos actuales para poder desarrollar un equipo no tripulado

volador capaz de brindar apoyo, contacto, suministros médicos y equipo que permita proteger la integridad física y mental de aquellos héroes que han sido víctimas de la naturaleza.

1.3 Justificación del problema

Las catástrofes naturales representan eventos devastadores que pueden afectar la vida, seguridad y comunicación en las sociedades. Estos sucesos aislados a menudo provocan en las comunidades desesperación gracias a la escasez de insumos médicos, alimentos y cuidado, exacerbada por las complejidades y peligros del entorno afectado [8]. En respuesta a esta urgente necesidad, se ha buscado desarrollar un método de transporte y comunicación de insumos médicos de manera eficiente y autónoma en comunidades aisladas o de difícil acceso, debido a las complicaciones geográficas que las caracterizan.

Los dispositivos UAV, equipados con tecnología avanzada, poseen la capacidad de sortear obstáculos y trazar rutas autónomas en diversos entornos, ofreciendo una solución viable para la comunicación, provisión y rescate en situaciones de emergencia. Específicamente, estos dispositivos emergen como una herramienta crucial en la gestión de tales catástrofes, al permitir un control manual y autónomo para la exploración, manipulación, monitoreo y transporte de elementos vitales en eventos trágicos, que con frecuencia resultan letales.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Diseñar un brazo robótico que se adapte a un mecanismo UAV de tamaño mediano utilizando herramientas de bajo costo para el transporte eficiente y autónomo de insumos médicos en comunidades aisladas, de difícil acceso o azotadas por alguna catástrofe.

1.4.2 *Objetivos específicos*

1. Desarrollar un prototipo funcional de un brazo robótico de 2 grados de libertad y una garra mecánica de 3 dedos destinado a la distribución de insumos médicos utilizando tecnología de vehículos no tripulados.
2. Establecer la comunicación y coordinación entre actuadores y controladores para el desarrollo de un mecanismo UAV de manipulación, control y monitoreo en tiempo real.
3. Desarrollar una interfaz de control para el manejo del brazo robótico y el dispositivo UAV.

1.5 Marco teórico

1.5.1 *Vehículos aéreos no tripulados*

Aunque su nombre real es RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) se lo conoce más comúnmente como vehículo aéreo no tripulado o Unmanned Aerial Vehicles (UAV), los cuales dentro de la industria 4.0 empiezan a verse como una solución en la mejora de los procesos gracias a la incorporación de nuevas tecnologías que han cambiado los modelos de negocios tradicionales [9]. Los drones están conformados por un conjunto de motores eléctricos que impulsan el dispositivo a través de un sistema multi-hélice que proporciona gran estabilidad en el momento de despegar, volar y aterrizar [10].

Figura 2

Un profesional de los drones, manejando uno de ellos [11].



Pueden operar en lugares catalogados como peligrosos, lo cual evita que las personas se expongan ante situaciones de riesgos como pueden ser incendios, trabajos en altura, espacios confinados, entre otros [12]. Además, su aplicación logra obtener una menor cantidad de emisión de gases de CO₂. Se estima que para el año 2025 su crecimiento en el mercado llegará a 14% aproximadamente, gracias a su aplicación en distintos sectores [13].

1.5.2 Manipulación robótica

Es considerada una habilidad avanzada que separa a los robots de otros sistemas computarizados y automatizados, ya que tienen la capacidad de interactuar de forma física y modificar o manipular ambientes para varias aplicaciones. Pese a que existen una gran cantidad de manipuladores robóticos, en distintos tamaños y formas, la mayoría de estos están conformados por un brazo robótico y una herramienta en la punta [14].

1.5.3 Telemedicina

Significa medicina a distancia, sean diagnósticos, tratamientos u otros, mediante el uso de recursos tecnológicos que optimizan la atención logrando un ahorro de tiempo y costo, así como

un aumento en la accesibilidad a los cuidados de salud, especialmente en zonas rurales y países de desarrollo [15].

1.5.4 Sistema Operativo Robótico (ROS)

Es una colección de frameworks para el desarrollo de software de robots, el cual brinda distintos servicios estándares como lo es el mantenimiento de paquetes, el control de dispositivos de bajo nivel, el paso de mensajes entre procesos, la implementación de funciones [16]. También proporciona herramientas que permite tanto escribir, como compilar y ejecutar códigos en distintas computadoras [17].

1.5.5 Estado del Arte

Actualmente, ya existen prototipos de drones que son capaces de levantar peso o nadar, sin embargo, se están desarrollando drones para aplicaciones en el sector médico con brazos robóticos [2].

El Hospital Kumamoto de la Cruz Roja Japonesa ha usado un modelo de servicio basado en drones de telemedicina llamado “dron ambulancia” para la distribución de carga médica durante emergencias. Dicho proyecto ha dado como resultado iniciativas que mejoran tanto la vida de las personas como las posibles barreras derivadas de lugares de difícil acceso. Para probar el funcionamiento del modelo, en el año 2020, se organizó dos pruebas de campo en áreas montañosas e insulares, en las cuales se logró la entrega de carga médica. Actualmente, este modelo de servicio es usado a diario y también es de gran ayuda para la búsqueda y rescate de personas [18].

Figura 3

Drones: Un miembro más en los equipos de búsqueda y rescate de personas [19].



Por otro lado, el proyecto ALE-HOP ha realizado un simulacro de reparto de medicamentos en el Hospital Cantoblanco. En la primera fase de dicho proyecto se logró cruzar el bosque de Valdelatas con éxito permitiendo tener una visión global de tiempo, coste, trazabilidad logística y emisiones de dióxido de carbono, mientras que la segunda fase, aún en estudio, consistirá en realizar el desplazamiento sin visión, es decir, en volar de manera autónoma [20].

Figura 4

Madrid completa con éxito el primer vuelo de drones para el transporte de material sanitario [20].

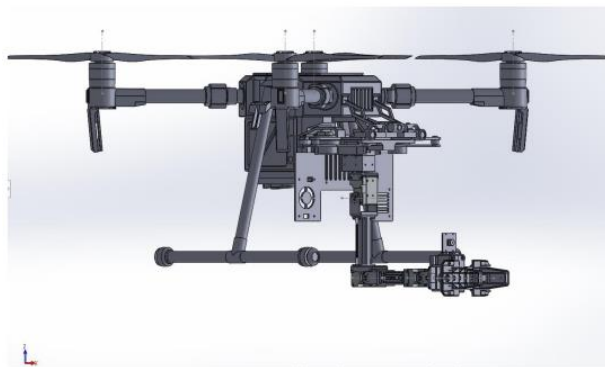


Y, por último, en el año 2022 en la Universidad Nacional de Chimborazo se realizó un proyecto de investigación que consiste en *el diseño y la implementación de un brazo robótico*

teleoperado 3dof adaptado a un dron para manipulación y transporte de cargas livianas en donde se interactuó con el nuevo sistema de manera física y virtual logrando realizar tareas de mayor complejidad y precisión como lo es el levantamiento de peso según las características del vehículo aéreo utilizado [17].

Figura 5

Ensamblaje de prototipo final para proyecto de investigación [17].



CAPÍTULO 2

2.1 Metodología.

En este capítulo se presentan las distintas alternativas de solución para la problemática planteada anteriormente, seleccionando la solución más adecuada según los criterios de diseño establecidos. Además, se presenta un análisis detallado de la solución elegida, destacando los aspectos mecánicos, electrónicos y computacionales del diseño propuesto, junto con los componentes que se implementarán.

2.2 Requerimientos del Diseño

Tabla 2.2.1

Requerimientos de diseño del proyecto.

Tipo de requerimiento	Detalles de requerimiento
Escalabilidad	• El sistema de control del mecanismo de manipulación debe adaptarse a cualquier tipo de objeto y aplicación, mientras se encuentre dentro del rango de sujeción y carga para el dron.
	• El diseño mecánico utilizado debe ser escalable para las condiciones de funcionamiento del cuadricóptero a utilizar.
Robustez	• La sujeción y manipulación de elementos debe ser firme y constante, acorde a los parámetros definidos por el controlador en todo momento.
	• Debe contar con un controlador PID para poder garantizar la seguridad e integridad del objeto a manipular.

	• Se deben implementar rutinas para servicios repetitivos de emergencia.
Experiencia de usuario	• El manejo en tiempo real por el usuario debe ser intuitivo, buscando un control amigable incluso para niños desde 10 años.
Comunicación	• La comunicación se realiza a través de un sistema maestro-esclavo, donde mediante comandos de terminal o una aplicación. • La comunicación en tiempo real permitirá conocer las posiciones del brazo, sin importar la distancia, siempre que se mantenga dentro del rango de comunicación entre el maestro y el esclavo.

Aspectos como la escalabilidad, robustez, la comunicación y la experiencia del usuario son fundamentales dentro del proceso de diseño de este proyecto. En el caso de la escalabilidad, esta se la puede considerar como en un rango de compromiso en la funcionalidad de un proyecto que permite medir la capacidad de ejecución de este al desarrollar una actividad específica. Además, incluye la proyección de adaptabilidad del sistema para futuras expansiones o aumentos en la carga de trabajo sin perder eficiencia ni rendimiento.

Este último aspecto, la precisión y fiabilidad en entornos dinámicos se mantienen mediante el uso de controladores PID, que gestionan cada posición del mecanismo de manipulación y del efector final, proporcionando estabilidad adicional y permitiendo ajustes finos y correcciones rápidas. Además, la implementación de rutinas para servicios repetitivos de emergencia asegura

que el sistema pueda responder adecuadamente a situaciones imprevistas, minimizando el riesgo de fallos y garantizando la continuidad de las operaciones críticas.

La comunicación eficiente es vital para el funcionamiento del sistema de manipulación, permitiendo un control preciso de los movimientos mediante un sistema maestro-esclavo. Esta configuración asegura que los comandos se ejecuten de manera fiable, facilitando la coordinación entre el dron y el manipulador seleccionado. La capacidad de comunicación en tiempo real es crucial, ya que permite conocer las posiciones del mecanismo sin importar la distancia, siempre que se mantenga dentro del rango de comunicación. Esto garantiza un control continuo y preciso, esencial para operaciones que requieren alta precisión y sincronización.

Además del requerimiento anterior, la experiencia del usuario es un aspecto crucial del diseño, ya que el sistema debe ser intuitivo y fácil de manejar en tiempo real. Un control amigable y accesible, diseñado para ser utilizado incluso por niños a partir de los 10 años, asegura que el sistema sea sencillo de operar, reduciendo el tiempo de entrenamiento necesario para nuevos operadores. Esto no solo mejora la eficiencia general del sistema, sino que también facilita su integración en diversas aplicaciones, permitiendo una respuesta rápida y eficaz a las demandas operativas.

Tabla 2.2.2

Componentes requeridos del diseño del proyecto.

Componente	Detalles de componentes de requerimiento
Componentes Mecánicos	El diseño del brazo debe buscar mantener tanto la inercia como la estabilidad del dron, tanto en vuelo como en tierra.

	• Los esfuerzos generados en cada extensión del diseño deben garantizar una sujeción firme y estable siempre, por lo que se debe implementar un sistema de transmisión de potencia que priorice el torque sobre velocidad de movimiento. • El número de actuadores debe ser lo más reducido posible para no sobrecargar el peso del equipo al instalarlo en el dron.
Componentes de Control	• Se realizará dentro del entorno de ROS Noetic para un manejo y funcionamiento físico y simulado en tiempo real.
Componentes Electrónicos	• La alimentación del sistema debe respetar los 12 voltios y 3.4 amperios necesarios para la alimentación completa del equipo a utilizar.

Para desarrollar este método de control y manipulación de objetos desde un dron de mediana escala, se requiere una integración meticulosa de los componentes de control, mecánicos y eléctricos para asegurar un rendimiento óptimo. El entorno ROS Noetic proporciona una plataforma robusta para el manejo y funcionamiento tanto físico como simulado en tiempo real, también permite realizar simulaciones precisas antes de la implementación física, asegurando que todos los componentes funcionen correctamente y que las operaciones se puedan realizar de manera eficiente y segura.

En cuanto a los aspectos mecánicos del diseño del mecanismo de manipulación, es crucial considerar la distribución de fuerzas y la estabilidad para mantener la inercia del dron, tanto en vuelo como en tierra. Un diseño adecuado debe garantizar que el mecanismo pueda operar

eficientemente sin desestabilizar el dron. Los esfuerzos generados en cada extensión del diseño deben asegurar una sujeción firme y estable en todo momento, utilizando un sistema de transmisión de potencia que priorice el torque sobre la velocidad de movimiento. Además, reducir el número de actuadores es fundamental para evitar sobrecargar el peso del dron, permitiendo una operación más eficiente y prolongada en vuelo.

La alimentación eléctrica del sistema es otro componente crítico que debe cumplir con requisitos específicos de 12 voltios y 3.4 amperios para garantizar el funcionamiento seguro y correcto del mecanismo de manipulación y sus componentes asociados. Mantener estos parámetros es esencial para evitar sobrecargas y asegurar la estabilidad del sistema durante la operación. Una fuente de alimentación confiable y adecuada asegura que todos los componentes electrónicos funcionen de manera óptima, permitiendo que el mecanismo de manipulación realice sus tareas con precisión y sin interrupciones. Además, una correcta gestión de la energía es vital para maximizar la duración de la batería del dron, extendiendo así el tiempo de operación y mejorando la eficiencia general del sistema.

2.3 Solución

2.3.1 Alternativas de Solución

A partir de los requerimientos de diseño y el contexto en el que se va a desenvolver la propuesta, surgió la idea del uso de vehículos aéreos no tripulados, dispositivos mecatrónicos que operan sin la necesidad de un piloto humano a bordo, los cuales pueden ser controlados de forma remota por un operador humano o pueden operar de manera autónoma siguiendo un conjunto de instrucciones preprogramadas.

Tomando en cuenta el uso de vehículos aéreos no tripulados, se definieron las siguientes alternativas de solución en cuanto al tipo de agarre que puede llegar a tener este sistema.

- **Alternativa 1:** El uso de garfios y ventosas requerirían de una superficie de sujeción exclusiva para el transporte del dron, caso contrario no sería posible garantizar la seguridad del equipo y los insumos durante el transporte, y al tratarse de elementos médicos o envases de cristal, podría representar una pérdida substancial para la finalidad de la iniciativa a realizar si llegan a sufrir de algún tipo de percance.
- **Alternativa 2:** En el caso del uso de cajas, requeriría de elementos más pesados que deben de ser depositados con ayuda humana de forma obligatoria, además que limitaría la capacidad de adaptabilidad del equipo al querer realizar procesos como toma de muestras o entrega de recursos.
- **Alternativa 3:** Una tercera opción que se evaluó, fue el uso de un elemento mecánico, controlado en tiempo real, que cuente con 2 grados de libertad de movimiento, es decir, un brazo robótico junto con una garra universal personalizado de tamaño reducido. En este último caso, se llegaría a poseer una gran ventaja de adaptabilidad, interactividad y seguridad para este tipo de aplicaciones.

Un detalle importante es que actualmente es posible ver, en la industria, este tipo de iniciativas en equipos de gran dimensionamiento, ya que drones grandes se utilizan en actividades de gran escala en las que se requiere del transporte de grandes cargas o de difícil traslado terrestre. A pesar de ello, no se ha considerado y/o estudiado en su totalidad el transporte de cargas medianas y pequeñas dentro de entornos reducidos o de difícil maniobrabilidad.

2.3.2 Criterios de Selección

Con el fin de resolver esta problemática, se identificaron los criterios de evaluación cruciales para el desarrollo de una solución óptima y competitiva dentro del campo profesional. Entre estos, los más destacados son:

- **Costo de manufactura:** Este criterio implica evaluar todos los gastos asociados con la producción, incluyendo materiales, mano de obra, tecnología, y procesos de fabricación. La meta es encontrar un equilibrio entre calidad y economía para asegurar que el producto final sea accesible y sostenible desde el punto de vista financiero.
- **Control de movimiento:** El control de movimiento es crucial para cualquier solución del proceso de transporte de suministros, especialmente cuando se trata de entornos complejos o adversos. Este aspecto se refiere a la capacidad del sistema para dirigir con precisión y eficacia el transporte de recursos frágiles y complejos, asegurando tanto la navegación segura como la estabilidad durante las operaciones críticas.
- **Conservación de inercias:** Este criterio se refiere a la capacidad del equipo o sistema para gestionar y reducir los efectos de las inercias durante maniobras y transporte de carga en entornos complejos y variables, especialmente cuando se transportan objetos cuya masa puede variar según los requerimientos del trabajo.
- **Dimensionamiento del equipo y entornos variables:** El dimensionamiento del equipo es un aspecto fundamental en el desarrollo de cualquier solución, puesto que, al tratarse de situaciones críticas o catastróficas, los espacios en los que se busca desarrollar no siempre poseerán un amplio margen de movimiento durante la ejecución del proceso.

- **Manejo en el proceso de transporte:** Al tratar con elementos de ayuda y asistencia médica en un entorno donde la casualidad está siempre a la orden del día, el método de transporte representa un factor crucial a considerar

En la Tabla 2.3.1 se presentan los criterios ordenados según su relevancia para el diseño de la solución, junto con los pesos correspondientes.

Tabla 2.3.1

Criterios de evaluación.

Criterio	Relevancia	Peso
Dimensionamiento del equipo y entornos variables	1	4
Costo de manufactura	2	3
Conservación de inercias	3	4
Control de movimiento	4	5
Manejo en el proceso de transporte	7	6

2.4 Matriz de Decisión

Una vez definidos los criterios de evaluación, se procede a construir una matriz de decisión donde se comparan las diferentes alternativas de solución propuestas, con el fin de determinar la opción más adecuada para la implementación en este proyecto.

Tabla 2.4.1

Matriz de decisión para la selección de alternativa.

	Peso	Opciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Criterio	4	Dimensionamiento del equipo y entornos variables	2	2	3
	3	Costo de manufactura	4	3	3
	4	Conservación de inercias	2	2	3
	5	Control de movimiento	2	3	5
	6	Manejo en el proceso de transporte	3	2	4
Resultados	Puntaje sin peso		13	12	18
	Puntaje con peso		56	53	82
	Prioridad		2	3	1

Según los resultados obtenidos en la Tabla 2.4.1, se definió como solución a la problemática la alternativa de solución 3, la cual propone implementar en el dron, un brazo robótico de 2 grados de libertad junto con una garra universal de tamaño reducido.

Esta alternativa destaca no solo por sus excelentes resultados en los criterios de selección, sino también por cumplir con todos los requisitos de diseño previamente definidos. El mecanismo de manipulación, altamente controlado y con gran maniobrabilidad, utiliza un sistema de control PID para garantizar un funcionamiento estable y preciso, minimizando el error entre la posición deseada y actual de cada una de las articulaciones del brazo y de la garra. Además, al emplear una garra universal y un brazo robótico con 2 grados de libertad montado en una base móvil, como el chasis del dron, facilita significativamente la sujeción y manipulación de objetos, y amplía considerablemente su espacio de trabajo.

Adicionalmente, al poder posicionar el brazo lo más cerca posible del chasis del dron y evitar el desplazamiento de los elementos transportados, gracias a su alta capacidad de sujeción y al controlador PID, se mantiene constante la inercia durante el vuelo, mientras no se realice ningún tipo de cambio de posición y esfuerzos entre las uniones del equipo de manipulación. Un movimiento controlado y moderado de cada una de las articulaciones del brazo reduce la variación de la inercia al cambiar las posiciones durante el vuelo.

2.5 Proceso de Diseño

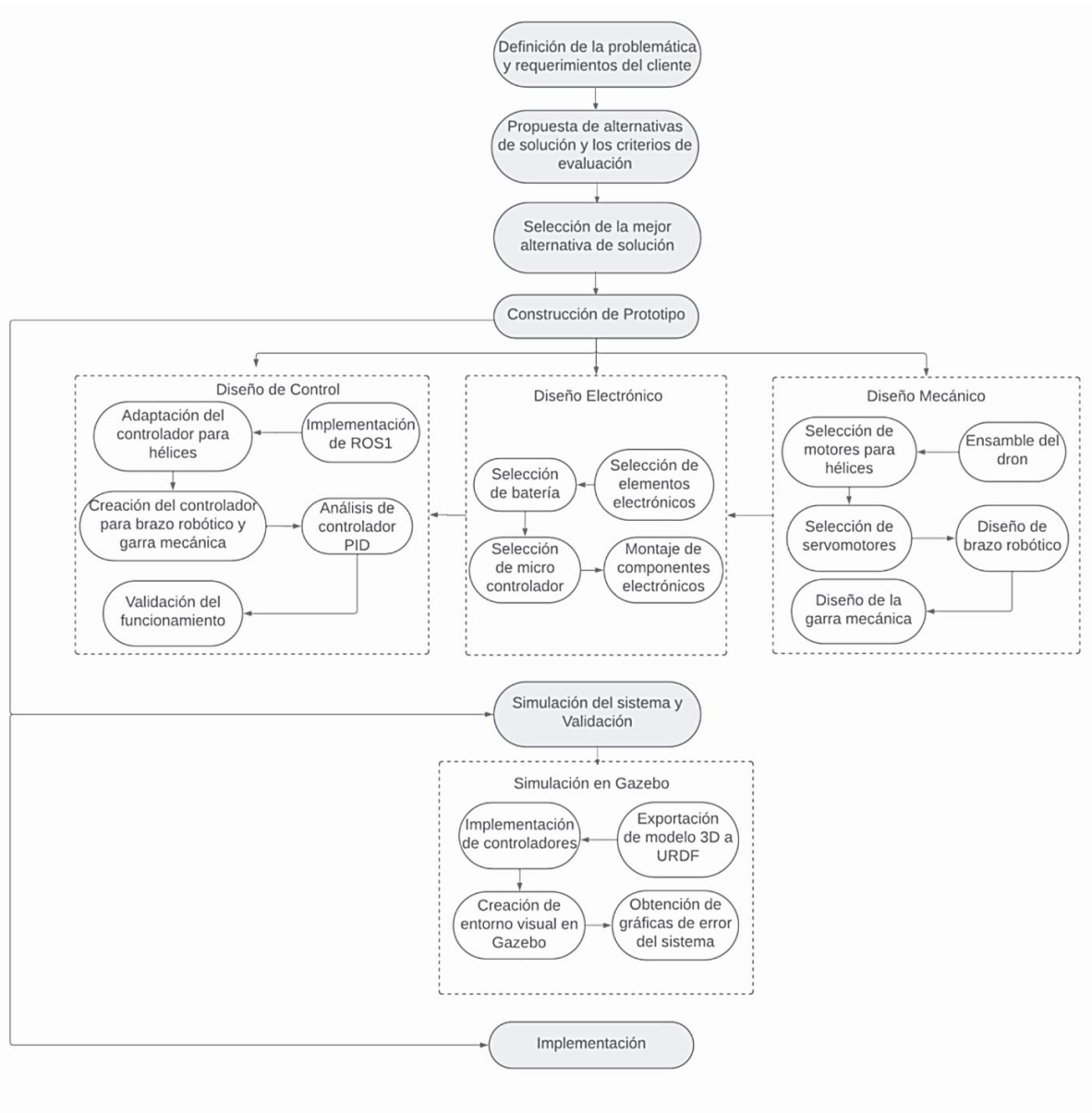
Para lograr el diseño final de la solución seleccionada, se siguieron varias etapas durante el proceso de desarrollo, como se ilustra en la Figura 2.4.1, conforme a los requisitos del cliente. En primer lugar, se identificó la problemática junto con los requerimientos del cliente. Luego, se generaron diversas alternativas de solución, evaluándolas según criterios de selección para determinar la mejor opción que resuelva la problemática.

El proceso de diseño comenzó con el diseño mecánico, donde se realizaron los diseños tanto del brazo robótico como la garra mecánica que se integrarían al dron. A continuación, se llevó a cabo el diseño electrónico, integrando los componentes electrónicos en el sistema.

Posteriormente, se procedió con el diseño de control, validando la funcionalidad de los controladores en el sistema operativo de ROS1. Una vez completado el modelo conceptual de la solución, se simuló el sistema y se validó en el entorno visual de Gazebo, preparándolo para su implementación final.

Figura 6

Proceso de Diseño.



2.6 Diseño Mecánico

En el proceso de diseño mecánico, se aborda inicialmente la creación del prototipo que servirá como solución a la problemática planteada, esto implica diseñar tanto el brazo robótico como de la garra mecánica que serán integrados a un dron de mediana escala.

2.6.1 Diseño del brazo robótico

Se diseñó el modelo del brazo robótico cuyo movimiento se da gracias al uso de dos servomotores de la marca Dynamixel. Este diseño incorpora dos brazos robóticos controlados por un servomotor, permitiendo el movimiento rotacional en el eje Y. Además, el sistema incluye un mecanismo de tornillo sin fin, impulsado por un segundo servomotor, para definir el movimiento en el eje Z del brazo principal. Este brazo se desplazará con una relación de 1:1 respecto al engranaje principal. A partir de este diseño, es posible obtener el sistema mecánico de brazo robótico de 2 grados de libertad.

Las especificaciones del diseño creado son las siguientes.

Tabla 2.6.1

Especificaciones del brazo robótico.

Especificaciones	Descripción
Grados de libertad	2
Material	TPU
Dimensiones	mm
Distancia entre los servomotores	mm
Color	Blanco y Naranja

Como se mencionó anteriormente, se hizo uso de un tornillo sin fin logrando obtener un diseño con 2 grados de libertad. Este componente es crucial según las especificaciones de los servomotores detalladas en la Tabla 2.6.2, ya que aumenta significativamente el par de giro de estos y mejora el control del movimiento que tendrá la garra mecánica acoplada al brazo robótico. En la

Tabla 2.6.3 se presentan las especificaciones del tornillo sin fin utilizado.

Tabla 2.6.2

Especificaciones de los servomotores Dynamixel [21].

Figura	Especificaciones	Descripción
	Modelo	XC430-W240-T
	Peso	65 g
	Par nominal	0.38 N
	RPM sin carga	70 RPM
	Voltaje de entrada	11.1 V
	Corriente de espera	46 mA
	Protocolo de comunicaciones	TTL

Figura 7 *Servomotor
Dynamixel.*

Tabla 2.6.3

Especificaciones del tornillo sin fin.

Especificaciones	Descripción
Módulo tangencial	1.250 mm
Ángulo de presión tangencial	30 gr
Número de roscas	6 su
Longitud de tornillo helicoidal	25 mm
Factor de diámetro	20 su
Número de dientes	50 su
Anchura de cara	12.700 mm

2.6.2 Diseño de la garra mecánica

El diseño mecánico de la garra universal busca desarrollar un mecanismo con un amplio rango de apertura y movimiento, junto con un manejo y control mecánico de sujeción eficientes. Para lograrlo, se desarrolló un modelo que aprovecha las capacidades elásticas del material de fabricación, el plástico para impresión 3D TPU y PLA, y herramientas mecánicas de conservación y transmisión de potencia, como resortes, poleas, correderas, ejes y engranajes. El resultado es un modelo de bajo dimensionamiento y costo, capaz de adaptarse fácilmente al tipo de agarre requerido, garantizando una contención firme y constante del objeto en todo momento.

En cuanto a la base de la garra, se requiere una superficie rígida que esté en contacto con la base del brazo robótico. Para su fabricación, se utiliza plástico de impresión 3D PLA, debido a su baja flexibilidad y alta resistencia, lo que lo convierte en una excelente opción para una base fija de la cual emergerán las uniones móviles del mecanismo. El componente mecánico empleado para la base de la garra incluye un sistema de transmisión de potencia accionado por un único actuador, un servomotor MG995, el cual a través de un sistema de engranajes helicoidales paralelos y cruzados, logra una relación de transmisión de potencia de 3:1 en un espacio reducido de aproximadamente 20,5 cm².

Adicionalmente, se incorpora un método de transmisión de potencia mediante el uso de correas con una relación 1:1, diseñado para mantener la misma relación de potencia y únicamente trasladar el torque desde los laterales de la base de la garra hacia las uniones móviles de los dedos de esta.

Tabla 2.6.4

Especificaciones de los servomotores MG995[22].

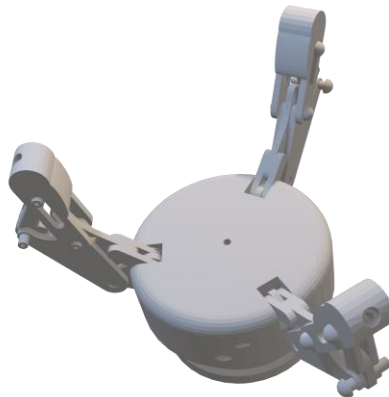
Figura	Especificaciones	Descripción
	Modelo	MG995
	Peso	55 g
	Dimensiones	40.7x19.7x42.9 mm
	Voltaje de funcionamiento	4.8 V a 7.2 V
	Ancho de banda	5 µs
	Rango de temperatura	0°C – 55°C

Figura 8 Servomotor MG995.

En cuanto a los dedos de la garra robótica, estos están fabricados tanto de plástico PLA como de TPU. Esta elección de materiales responde a la necesidad de que ciertas partes móviles del sistema, como los rieles y ejes de transmisión, no sufran deformaciones significativas, para lo cual se utiliza PLA debido a su rigidez y resistencia. En contraste, los extremos de los dedos se fabrican con TPU, cuya alta flexibilidad permite un agarre sólido sin dañar o deformar el objeto manipulado. Esta combinación de materiales asegura tanto la integridad de la garra como la del objeto.

Figura 9

Imagen del prototipo de garra robótica.



El sistema mecánico de los dedos se diseñó para aprovechar movimientos rotacionales y lineales, alcanzando una apertura máxima de 172° , lo que proporciona un amplio margen de control y eficiencia durante los procesos de colección y agarre en tiempo real. Un aspecto crucial de este diseño es la incorporación de sistemas de resortes, los cuales actúan como métodos de almacenamiento de energía. Estos resortes juegan un papel vital al proporcionar una fuerza constante durante el agarre, asegurando que los dedos mantengan una presión uniforme y estable en la posición final.

En conjunto, el sistema contará con la base anteriormente descrita, junto con tres dedos articulados, formando un sistema de garra robótica universal con un área de manipulación de 490 cm². Esto permite garantizar la seguridad y estabilidad de los objetos que lleguen a ser manipulados por este diseño.

2.7 Diseño Electrónico

Una vez montado el dron con sus respectivas piezas, se procedió a realizar el diseño electrónico considerando la problemática a resolver en zonas remotas, para esto se seleccionaron cuidadosamente los sensores necesarios para equipar adecuadamente al dron.

2.7.1 Selección de sensores

La batería usada en este proyecto cuenta con las siguientes especificaciones.

Tabla 2.7.1

Especificaciones de la batería LiPo [23].

Figura	Especificaciones	Descripción
	Modelo	PT-B3400N-NSR45
	Peso	334 g
	Voltaje	14.8V

	Voltaje de corte	2.8V
	Capacidad	3.400 mAh

Figura 10 Batería LiPo.

También se utilizó una placa de cubo de potencia U2D2, o mejor conocido como tarjeta U2D2. Esta placa permite suministrar distintas fuentes de alimentación garantizando un funcionamiento eficiente y seguro de los demás componentes del sistema.

Tabla 2.7.2

Especificaciones de la tarjeta U2D2 [24].

Figura	Especificaciones	Descripción
	Fabricante	ROBOTIS
	Dimensiones	48mm X 57mm
	Voltaje de funcionamiento	3.5V ~ 24V
	Corriente máxima	10A

Figura 11 Tarjeta U2D2.

En cambio, el modelo de comunicación por computadora U2D2 usado permite transferir datos entre la placa de desarrollo y los servomotores Dynamixel.

Tabla 2.7.3

Especificaciones del modelo de comunicación U2D2 [25].

Figura	Especificaciones	Descripción
	Fabricante	ROBOTIS
	Dimensiones	48x18x14.6 mm
	Peso	9 g
	Baudios	Max 6Mbps

Por último, se usó la placa de computadora Raspberry Pi 4 modelo B para gestionar el control y procesamiento de datos, logrando la comunicación entre los sensores del sistema.

Figura 13

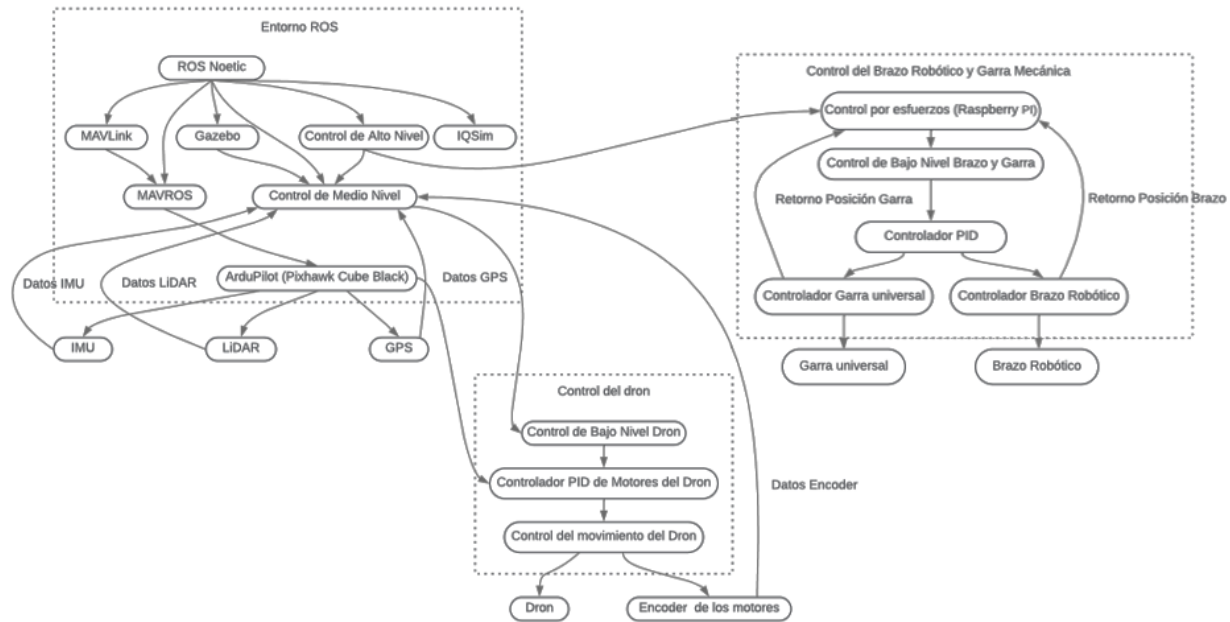
Raspberry PI 4 modelo B [26].



2.8 Diseño de Control

Figura 14

Imagen donde se detalla el diseño de control.



Se exploró el diseño y las aplicaciones de un sistema de control jerárquico basado en nodos, utilizando ROS y MAVROS, enfocados especialmente en la integración de un brazo robótico con una garra universal para operaciones de manipulación.

El sistema de control jerárquico presentado combina múltiples capas de abstracción y funcionalidades, permitiendo al cuadrimotor aéreo no solo mantener la estabilidad y navegar con precisión, sino también interactuar activamente con su entorno mediante el uso de un brazo robótico de dos grados de libertad y una garra universal. Esta estructura jerárquica optimiza la eficiencia operativa y la seguridad de la carga, haciendo uso de simulación en Gazebo para pruebas antes y durante de la implementación en el mundo real.

Como entorno de simulación y control a tiempo real, se utilizará ROS Noetic, gracias a su capacidad de ejecución paralela de procesos, la cual permite la coordinación de operaciones complejas como la planificación de misiones y procesos de carga y descarga de recursos de manera simultánea. Al utilizar nodos especializados en misión y planificación, ROS interpretará datos sensoriales que garanticen la seguridad tanto del dispositivo de vuelo como la carga a transportar, además de planificar rutas óptimas para el traslado de las mismas. Gracias a ello el sistema presenta una ventaja significativa en términos de toma de decisiones, optimización de recursos y desplazamiento masivo dentro de entornos complejos.

Con el fin de obtener un control detallado de los aspectos de vuelo, aterrizaje y propiedades del dron, se utilizará MAVROS, un recurso que busca actuar como puente entre ROS y el pilotaje autónomo del dron que es ArduPilot, con el cual se pueda generar la comunicación bidireccional en tiempo real entre el equipo físico o simulado y el centro de control. Esta conexión permite enviar comandos de control precisos al UAV y recibir datos de telemetría esenciales para monitorear su estado, localización, estabilidad y rendimiento durante sus misiones. Estos aspectos de retroalimentación a tiempo real serán realizados por una capa de control de alto nivel, responsable del proceso de toma de decisiones basadas en los datos emitidos por cada uno de los sensores a utilizar; enviando comandos a una capa de control de nivel medio, responsable de la estabilidad y navegación del UAV, la cual, por medio de comandos de posición, velocidad y orientación sea posible ejecutar acciones previamente planificadas de desplazamiento, que garanticen la calidad y seguridad de la carga y el transporte.

Se utilizaron los protocolos de comunicación de bajo nivel para conectar la comunicación entre los protocolos de control medianos y los motores, los cuales utilizan controladores PID independientes para cada motor, asegurando movimientos suaves y estables en el vuelo y el

proceso de manipulación de objetos. Esta capa de control garantiza la estabilidad en diversas condiciones ambientales y situaciones de vuelo, proporcionando una base robusta para la ejecución de tareas de alta precisión.

Como un método de interacción con el entorno dentro de zonas complejas, se busca integrar un brazo robótico y una garra universal de bajo dimensionamiento. Este brazo, controlado por un sistema de control por esfuerzos basado en PID, ofrece una capacidad única para realizar operaciones de manipulación de recursos, conocida también como “PICK & PLACE”, dentro de estas zonas de difícil acceso o maniobrabilidad. Este sistema permite adaptarse dinámicamente a cambios en la carga y las condiciones del entorno, asegurando un manejo seguro y eficiente de objetos de diferentes pesos y geometrías, mientras se mantengan en el rango de operación proporcionado.

CAPÍTULO 3

3.1 Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos considerando los distintos aspectos que conforman la solución propuesta. Estos incluyen el diseño mecánico y de control, así como la simulación realizada de la solución y el aplicativo que facilita su control sencillo y dinámico. Finalmente, se presenta el análisis de costos del producto final.

3.2 Sistema Mecánico

3.2.1 Diseño Mecánico del Brazo Robótico

Para obtener los resultados del análisis dinámico de esfuerzo y factor de seguridad, se utilizó el programa SolidWorks. En este análisis se evaluó la solución propuesta bajo la condición de soportar un peso máximo de 5 kg considerando tanto los materiales como las dimensiones de los distintos componentes que conforman el diseño de dicha solución.

En el análisis de tensión se hizo uso del método de Von Mises, en donde se muestra que las máximas deformaciones resultantes no sobrepasan los 2158000 N/m^2 en su zona más crítica, es decir 2.158 MPA. Al comparar este valor con el límite de fluencia de los materiales usados en el prototipo, PLA con 60 MPA y TPU con 50 MPA, se garantiza que el diseño no está sobrecargado y por ende no va a tener riesgos de fallar.

Figura 15

Análisis estático con método de Von Mises.

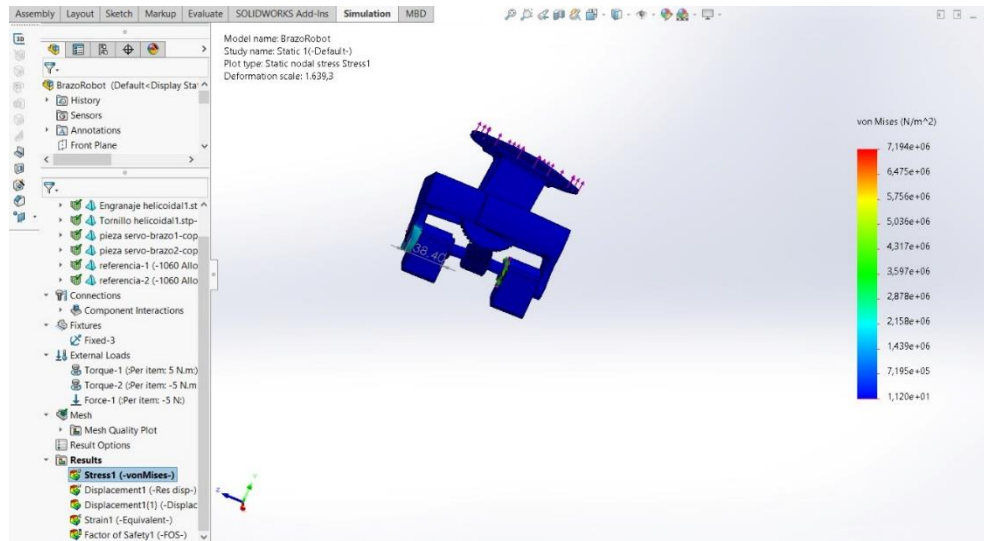
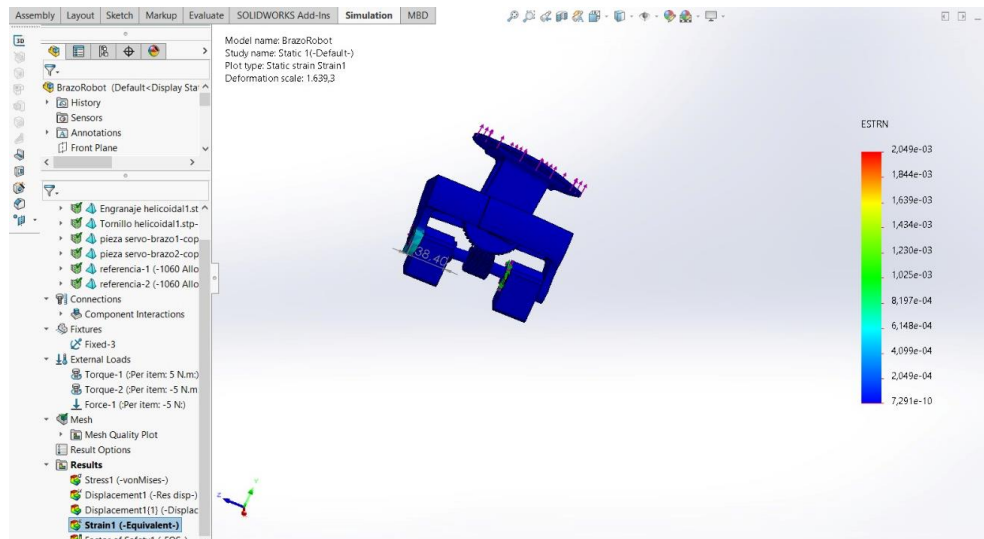


Figura 16

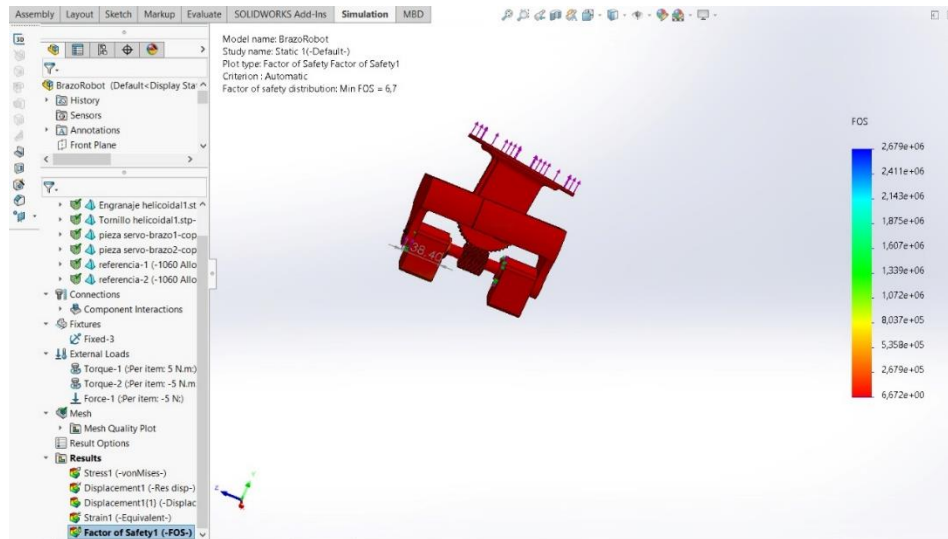
Análisis estático con método de deformaciones.



En la Figura 16 se muestra que la zona más propensa a sufrir deformaciones es la unión entre el servomotor y los brazos.

Figura 17

Análisis del factor de seguridad.



En cuanto al factor de seguridad, se obtuvo un valor de 6, lo que demuestra que el diseño es seguro y puede implementarse ya que resiste las cargas reales planteadas sin fallos.

Una vez impresa todas las piezas, se realizó el ensamble del prototipo, obteniendo el modelo que se visualiza a continuación.

Figura 18

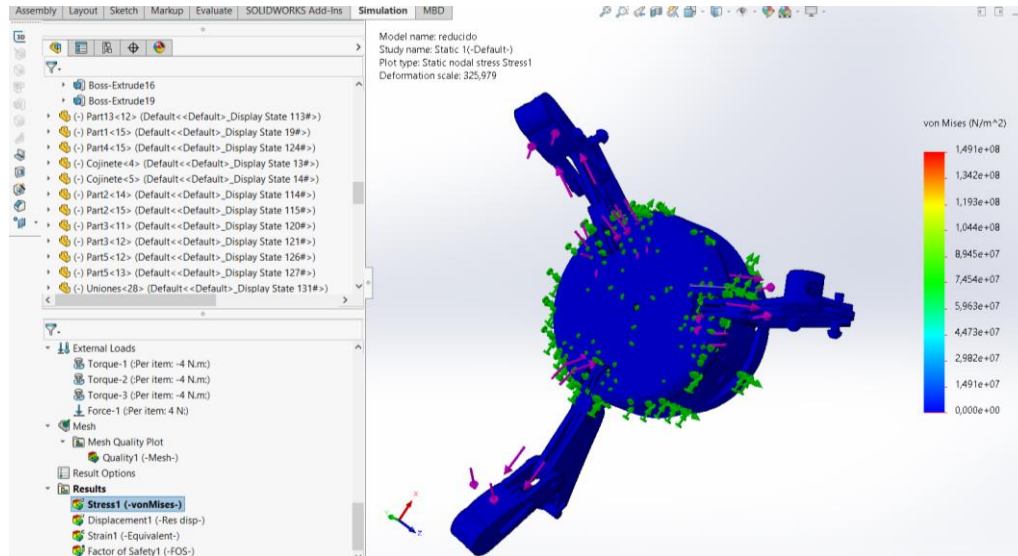
Prototipo de la solución en impresión 3D.



3.2.2 Diseño Mecánico de la Garra mecánica

Figura 19

Análisis dinámico de esfuerzo y factor de seguridad.



Este mecanismo de garra, cuenta con un sistema de distribución de potencia utilizando una caja de engranajes, con relacion 2.44:1, junto con un mecanismo de correa sincronia 1:1, con el cual busca realizar el movimiento de cada una de las garras utilizando unicamente 1 solo servomotor MG950, con un torque máximo de $9.4 \text{ Kg} * \text{cm}$.

Ecuación 3.2.1

Relación de caja de engranaje

$$R_{E_1} - R_{(E_2+E_3)} = \frac{18 \text{ mm}}{5.2 \text{ mm}}$$

$$R_{(E_2+E_3)} - R_{4,5,6} = \frac{10.4 \text{ mm}}{18 \text{ mm}} * \frac{1}{3}$$

$$R_{4,5,6} - R_{7,8,9} = \frac{7.6 \text{ mm}}{10.4 \text{ mm}}$$

$$R_{7,8,9} - R_{10,11,12} = \frac{6.4 \text{ mm}}{7.6 \text{ mm}}$$

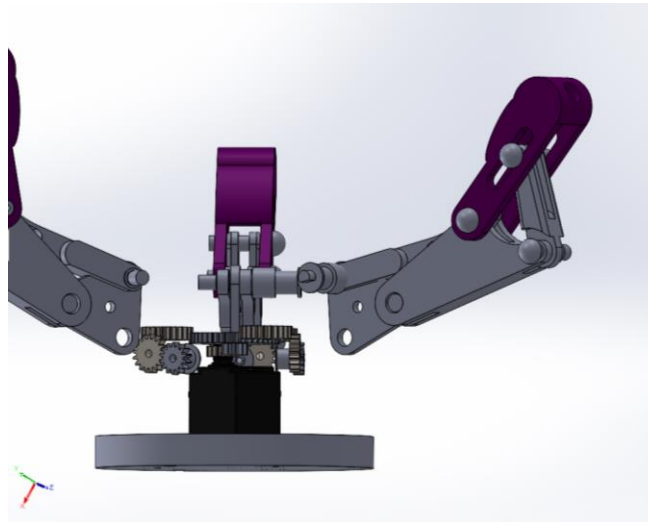
$$R_{E_1} - R_{10,11,12} = \frac{18 \text{ mm}}{5.2 \text{ mm}} * \frac{10.4 \text{ mm}}{18 \text{ mm}} * \frac{1}{3} * \frac{7.6 \text{ mm}}{10.4 \text{ mm}} * \frac{6.4 \text{ mm}}{7.6 \text{ mm}} \cong 0.41$$

$$T_{E_1} - T_{E_{10,11,12}} = (R_{E_1} - R_{10,11,12})^{-1} = 2.4375$$

De esta manera permitiendo una distribución de torque máximo a cada uno de los dedos de $22.9125 \text{ Kg} * \text{cm}$.

Figura 20

Sistema de engranajes.

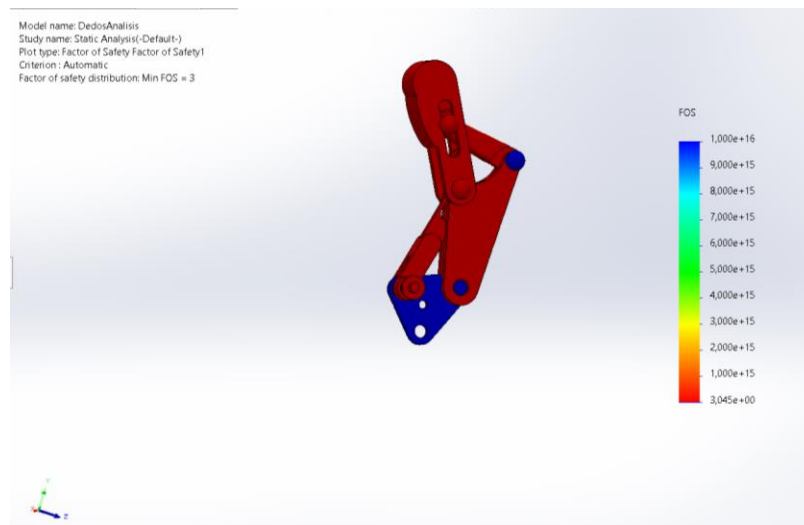


Para poder asemejar el comportamiento de sujeción de la garra mecánica, se procedió a realizar el analisis de cada uno de los dedos, en donde se llevará a acabo el proceso de sujecion de cada objeto a considerar. Para esto, se busco distribuir la carga del objeto de forma equitativa en cada una de las areas de sujecion correspondientes, considerando el peor escenario posible, en donde el angulo de sujeción entre la garra y el objeto sea de 90° , dando como resultado el peso de la carga a considerar sea distribuido de forma equitativa entre cada uno de estos.

Gracias a este analisis se procedió a realizar la simulación de carga estatica del objeto. Para poder garantizar la seguridad de agarre y funcionamiento de este sistema, se decidió por un factor de seguridad minimo de 3.

Figura 21

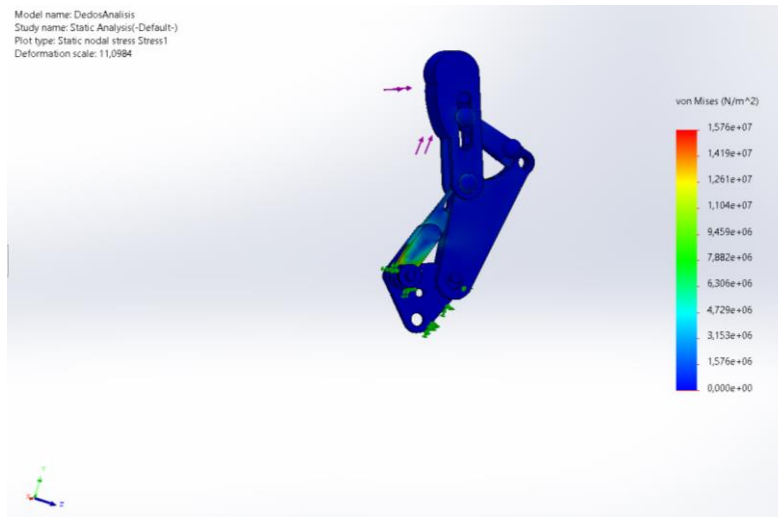
Factor de seguridad de cada uno de los dedos.



Dando como resultado, cuando las cargas en cada uno de los dedos sea de 3.5 libras, se poseerá un factor de seguridad de tal magnitud. De igual manera, en base a este valor de carga sobre cada dedo, se obtivo como resultado un valor de Vonn Mises de 0.01576 GPA, cuando el valor de fatiga del material (PLA) es de 3.5 GPA. De esta manera es posible garantizar la funcionalidad de la propuesta para cargas estaticas de hasta 9 libras de sujecion.

Figura 22

Análisis de Von Mises de cada dedo.



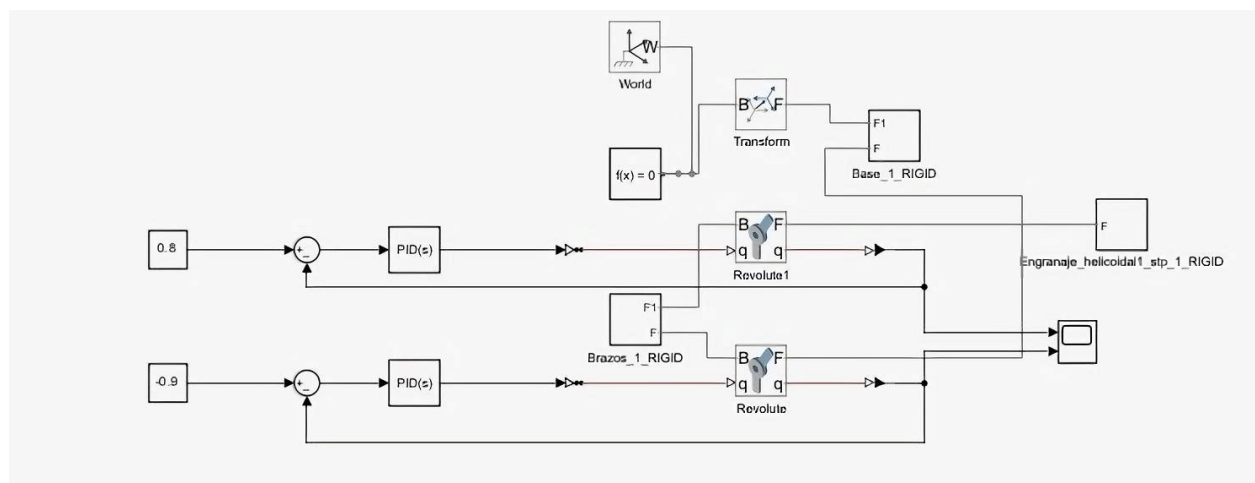
Tras realizar el análisis dinámico y estático del sistema, se debe de verificar la capacidad de apertura que posee el prototipo, dando como resultado un valor de diámetro de 272.00 mm de diámetro. Lo que implica un área de sujeción de 582 cm^2 , permitiendo un área de sujeción, hasta dos veces mayor a la requerida para sostener un paquete de insumos médicos promedio de 272 cm^2 .

Prototipo de la solución en impresión 3D.



3.3.1 Simulación del modelo para el brazo en Matlab.

Diagrama en Matlab.

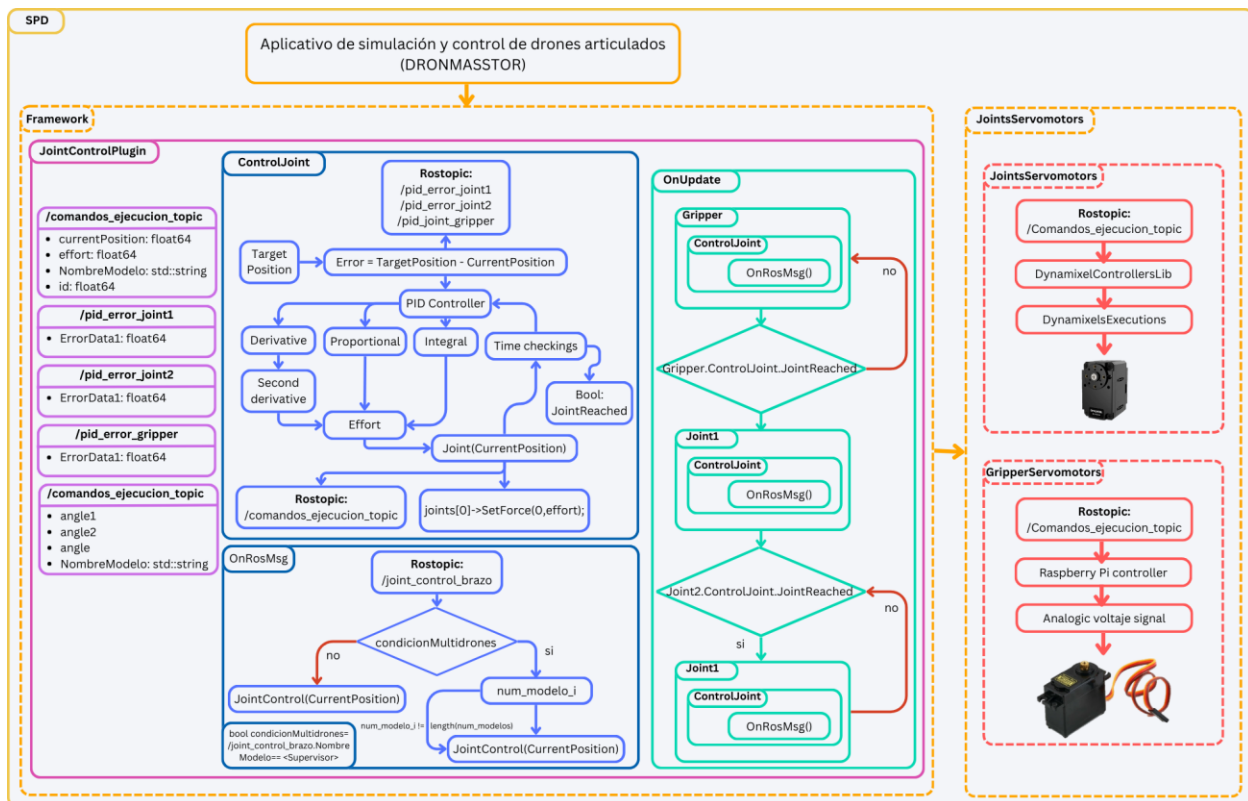


En este diagrama se muestra el modelo de control para cada una de las articulaciones del brazo robótico dentro del entorno de Matlab. En este diagrama se puede evidenciar el comportamiento que se desea observar en el modelo al implementar un sistema de control en base a esfuerzos utilizando controladores PID para poder definir un comportamiento específico a cada una de las articulaciones del sistema.

3.3.2 Arquitectura de Control y Software

Figura 25

Arquitectura de control.



En este diseño para arquitectura de software y control del modelo presenta el principio de funcionalidad para el modelo en físico y mediante simulación. Destacando los métodos de control

de múltiples drones, así como el uso de tópicos para el sistema de control y manejo de servomotores por medio de tópicos de comunicación.

3.4 Pruebas del modelado

3.4.1 Pruebas de simulación

Para poder tener un control fácil y amigable con el entorno de simulación y el equipo físico, se utilizó un aplicativo virtual como medio hombre-máquina para que el operario sea capaz de tener acceso al control maestro del dispositivo.

Figura 26

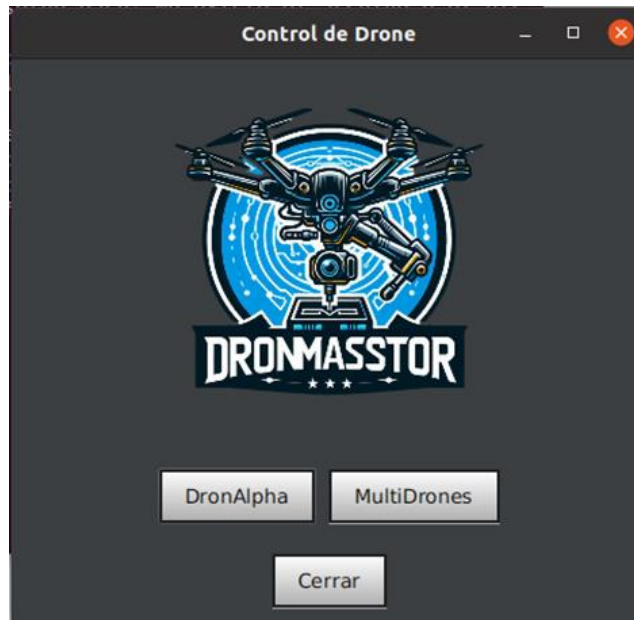
Portada del aplicativo.



Al iniciar con el aplicativo, la primera ventana nos ofrece la posibilidad de selección de un sistema de control para un único modelo *DronAlpha* o en su defecto la selección de un sistema de múltiples drones *MultiDrones*. En ambos casos, el usuario desplegará un mundo vacío en Gazebo, en donde se pueden divisar los drones seleccionados por el mismo.

Figura 27

Aplicativo o interfaz gráfica.

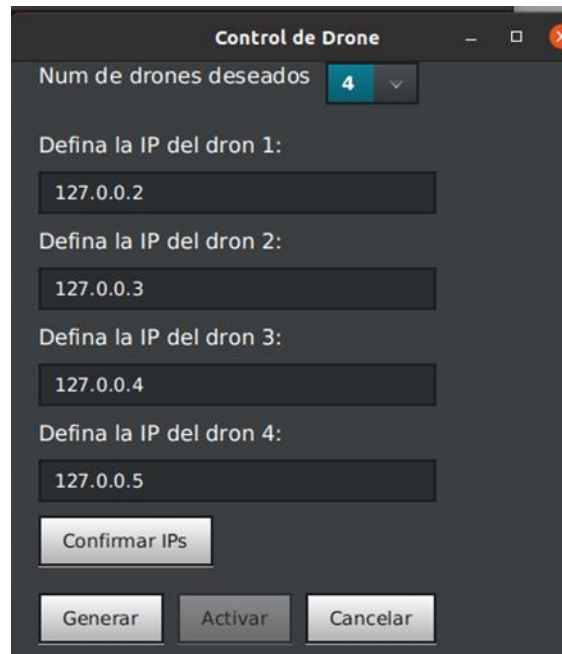


3.4.2 Sistema de Multidrones

En caso de seleccionar la opción de múltiples drones, se deberá de definir las *IPs* de cada uno de estos para poder relacionarlos con cada uno de sus modelos físicos. Por lo tanto, al momento de seleccionar la opción de *MultiDrones* la aplicación procederá a presentar otra pantalla en donde se pueda definir cada una de estas.

Figura 28

Definición de IPs de los drones en el aplicativo.



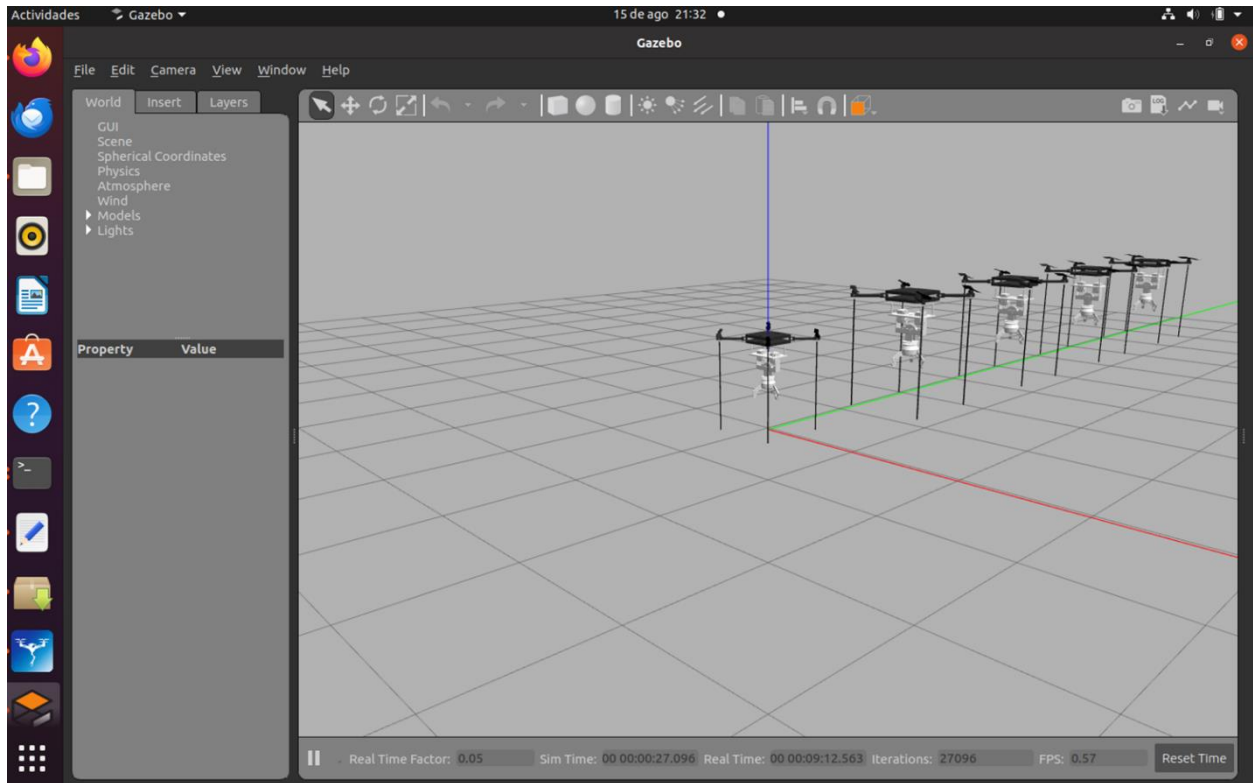
The screenshot shows a window titled "Control de Drone" with a dark theme. At the top, there is a label "Num de drones deseados" followed by a dropdown menu showing the number "4". Below this, there are four labels: "Defina la IP del dron 1:", "Defina la IP del dron 2:", "Defina la IP del dron 3:", and "Defina la IP del dron 4:". Each label is followed by a text input field containing an IP address: "127.0.0.2", "127.0.0.3", "127.0.0.4", and "127.0.0.5" respectively. At the bottom of the form, there is a button labeled "Confirmar IPs". Below the "Confirmar IPs" button, there are three buttons: "Generar", "Activar", and "Cancelar".

En esta pantalla, será posible definir la cantidad de drones a generar, junto con la definición de cada una de las *IPs* requeridas para cada uno de estos equipos. En caso de querer cambiar alguna *IP* dentro del aplicativo, es requerido hacer el cambio dentro de las casillas de texto para cada una de estas, junto con el botón “*Confirmar IPs*”.

Para poder generar estos modelos en el entorno de Gazebo hay que clicar en “*Generar.*” Tras esto se mostrará una nueva terminal en donde se evidenciará el estado y comportamiento de cada uno de los modelos, además de abrirse el entorno de simulación.

Figura 29

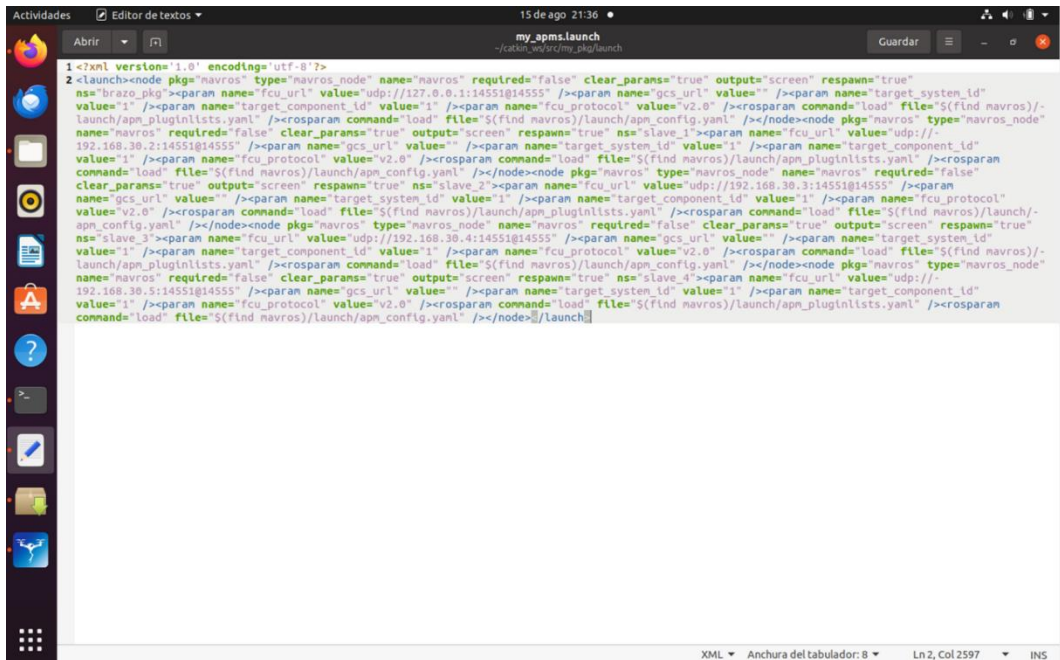
Imagen donde se visualizan los múltiples drones en la simulación.



Al realizar esta acción además de mostrar el entorno simulando se actualiza el archivo *my_amps.launch* dentro de la carpeta *launch* para que se pueda activar la configuración de cada dron con la librería Ardupilot.

Figura 30

Archivo *my_amps.launch*.



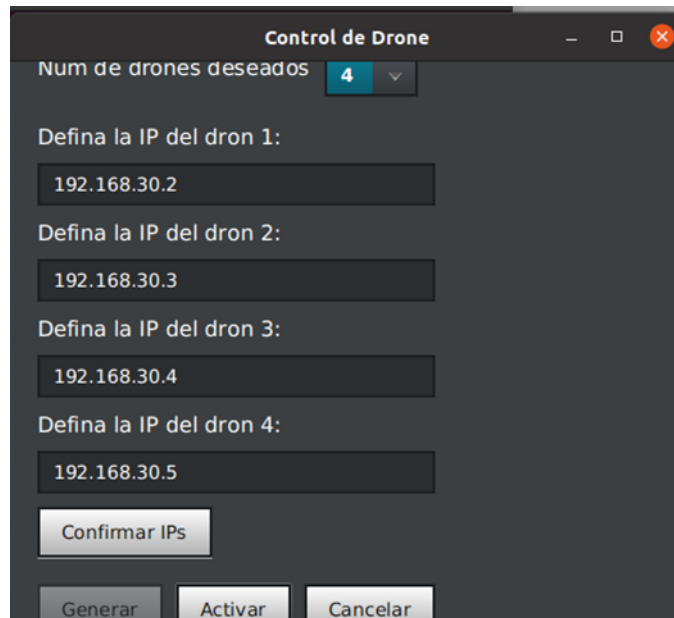
The screenshot shows a text editor window titled "my_amps.launch" with the following XML content:

```
1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2 <launch>
  <node pkg="navros" type="navros_node" name="navros" required="false" clear_params="true" output="screen" respawn="true"
    ns="brazo_pkg">
    <param name="fcd_url" value="udp://127.0.0.1:14551@14555"/>
    <param name="gcs_url" value="" />
    <param name="target_system_id" value="1" />
    <param name="fcd_protocol" value="v2.0" />
    <rosparam command="load" file="$(find navros)/launch/apn_config.yaml" />
    <node pkg="navros" type="navros_node"
      name="navros" required="false" clear_params="true" output="screen" respawn="true" ns="slave_1">
      <param name="fcd_url" value="udp://192.168.30.2:14551@14555"/>
      <param name="gcs_url" value="" />
      <param name="target_system_id" value="1" />
      <param name="target_component_id" value="1" />
      <param name="fcd_protocol" value="v2.0" />
      <rosparam command="load" file="$(find navros)/launch/apn_config.yaml" />
      <node pkg="navros" type="navros_node" name="navros" required="false"
        clear_params="true" output="screen" respawn="true" ns="slave_2">
        <param name="fcd_url" value="udp://192.168.30.3:14551@14555"/>
        <param name="gcs_url" value="" />
        <param name="target_system_id" value="1" />
        <param name="target_component_id" value="1" />
        <param name="fcd_protocol" value="v2.0" />
        <rosparam command="load" file="$(find navros)/launch/apn_config.yaml" />
        <node pkg="navros" type="navros_node" name="navros" required="false" clear_params="true" output="screen"
          respawn="true" ns="slave_3">
          <param name="fcd_url" value="udp://192.168.30.4:14551@14555"/>
          <param name="gcs_url" value="" />
          <param name="target_system_id" value="1" />
          <param name="target_component_id" value="1" />
          <param name="fcd_protocol" value="v2.0" />
          <rosparam command="load" file="$(find navros)/launch/apn_config.yaml" />
          <node pkg="navros" type="navros_node"
            name="navros" required="false" clear_params="true" output="screen" respawn="true" ns="slave_4">
            <param name="fcd_url" value="udp://192.168.30.5:14551@14555"/>
            <param name="gcs_url" value="" />
            <param name="target_system_id" value="1" />
            <param name="target_component_id" value="1" />
            <param name="fcd_protocol" value="v2.0" />
            <rosparam command="load" file="$(find navros)/launch/apn_config.yaml" />
            <node pkg="navros" type="navros_node" name="navros" required="false" clear_params="true" output="screen"
              respawn="true" ns="slave_5">
              <param name="fcd_url" value="udp://192.168.30.6:14551@14555"/>
              <param name="gcs_url" value="" />
              <param name="target_system_id" value="1" />
              <param name="target_component_id" value="1" />
              <param name="fcd_protocol" value="v2.0" />
              <rosparam command="load" file="$(find navros)/launch/apn_config.yaml" />
            </node>
          </node>
        </node>
      </node>
    </node>
  </launch>
```

Para poder lanzar esta librería se le da clic en el botón “Activar”.

Figura 31

Activación de los drones según IPs.



The image shows a software window titled "Control de Drone". At the top, there is a label "Num de drones deseados" followed by a dropdown menu showing the number "4". Below this, there are four input fields, each preceded by a label: "Defina la IP del dron 1:", "Defina la IP del dron 2:", "Defina la IP del dron 3:", and "Defina la IP del dron 4:". The input fields contain the IP addresses "192.168.30.2", "192.168.30.3", "192.168.30.4", and "192.168.30.5" respectively. At the bottom of the window, there are three buttons: "Confirmar IPs", "Generar", and "Activar". The "Activar" button is highlighted with a light blue background.

Tras activar cada uno de los drones, se debe de preparar el entorno para el proceso de simulación del que se basa el sistema para el manejo del dron usando las librerías de Ardupilot. Para esto, es requerido activar el botón de “Activar simulación”.

Figura 32

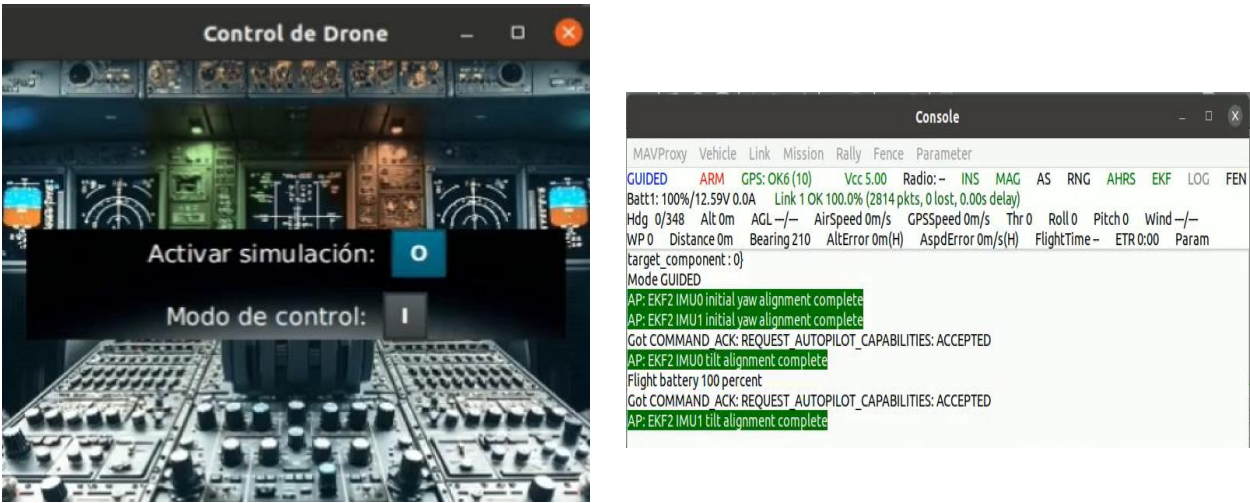
Pestaña de control en aplicativo.



Finalmente, para poder acceder al control por posición del dispositivo no tripulado, es requerido la activación del modo *GUIDADO*, para ello se requiere activar el segundo botón tras haberse activado el sistema del gps, dentro de la ventana de estado del dron

Figura 33

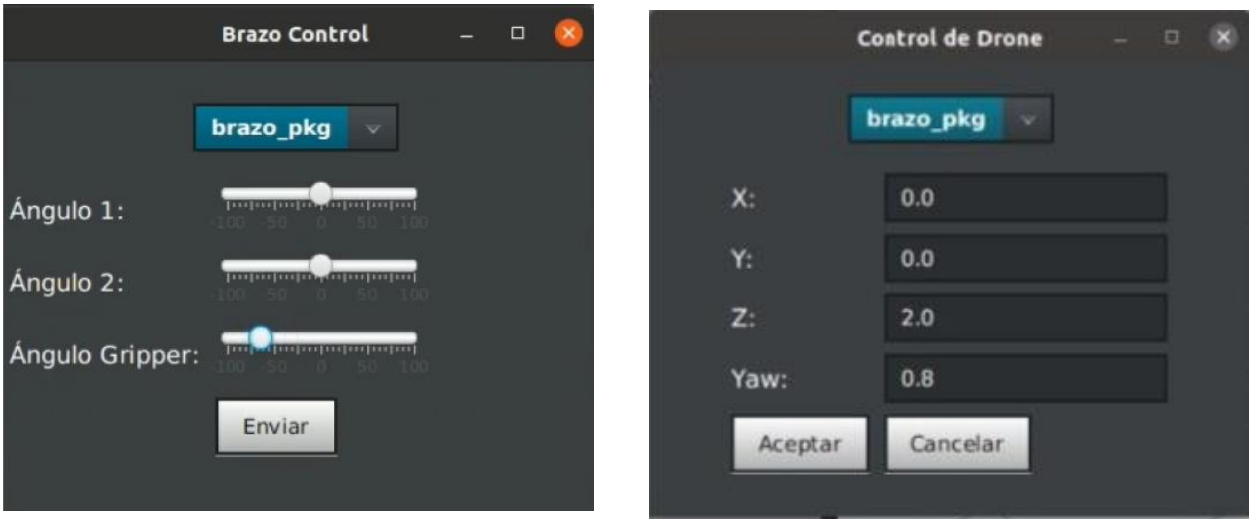
Activación del modo guiado.



Tras preparar tanto el entorno, como el equipo a utilizar, se puede llegar a tener un control de la posición en la que se quiere depositar el dron, así como el comportamiento que se llevará a cabo por parte del manipulador.

Figura 34

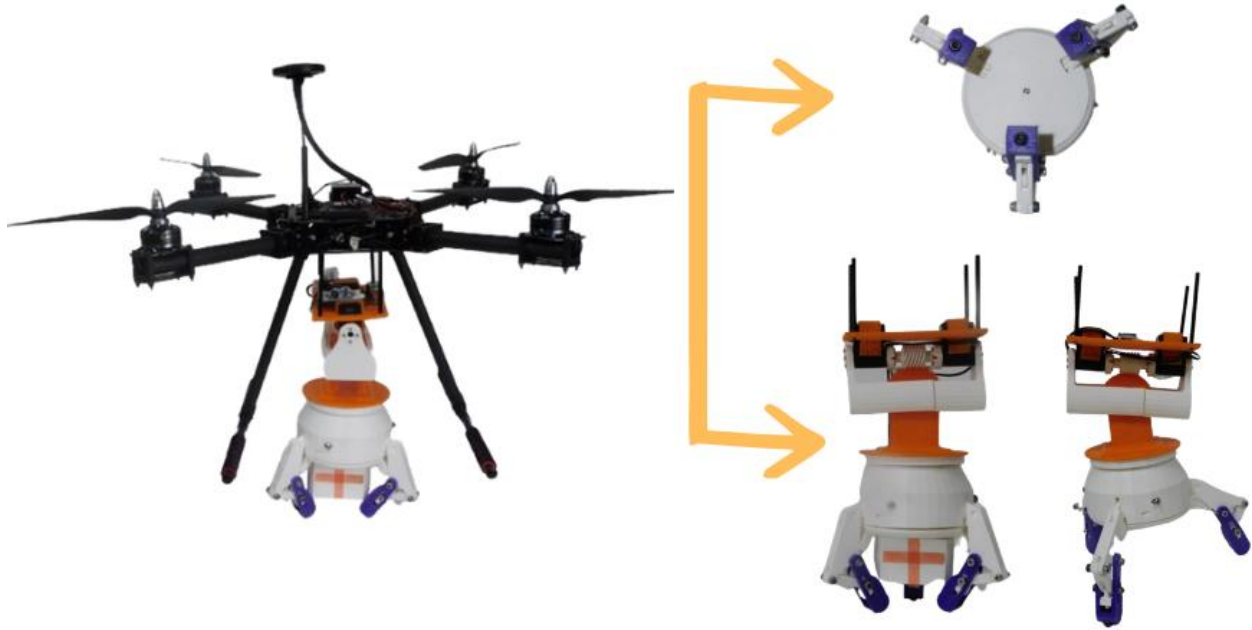
Control de la posición.



3.5 Pruebas de Equipo Físico

Figura 35

Prototipo impreso y acoplado a un dron.



Se realizaron las pruebas de funcionamiento del brazo robótico utilizando como controlador un Raspberry Pi 4, la cual, mediante la instalación de Docker, se pudo realizar un programa de control para los múltiples servomotores utilizando las señales emitidas por el software a tiempo real por medio de comunicación por tópicos. Es importante destacar el manejo de las señales de los servomotores, como posición, torque y velocidad, son emitidas de misma forma al software como medio de retroalimentación de control a tiempo real.

3.6 Análisis de Costos

Para el análisis de costos en este proyecto se consideraron tanto los componentes mecánicos como electrónicos utilizados en el prototipo final, mencionados ya en el capítulo 2. De igual manera, se detallan gastos adicionales como lo es la impresión en 3D con sus respectivos materiales.

Es necesario recalcar que la mayoría de los componentes fueron adquiridos en tiendas en línea, por lo que el costo reflejado en la Tabla 3.6.1 es un valor aproximado.

Tabla 3.6.1 *Análisis de Costos.*

Tipo de Sistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Mecánico	Servomotor Dynamixel XC430-W240-T	2	\$120.00	\$ 240.00
	Rodamiento de bolas rígidos 608-ZZ con cubierta de lata	2	\$ 5.00	\$ 10.00
	Kit de Pernos	1	\$ 29.00	\$ 29.00
	Kit de Resortes	1	\$ 9.00	\$ 9.00
	Microcontrolador Raspberry Pi 4 modelo B	1	\$ 62.00	\$ 62.00
Eléctrico y de Control	Batería LiPo PT-B3400N-NSR45	1	\$ 57.00	\$ 57.00
	Placa de cubo de potencia U2D2	1	\$ 50.20	\$ 50.20
	Driver U2D2	1	\$ 32.10	\$ 32.10
	Servomotor MG995	1	\$ 10.00	\$ 10.00
	Rollo de filamento PLA	1	\$ 20.00	\$ 20.00

Gastos	Rollo de filamento TPU	1	\$ 20.00	\$ 20.00
Adicionales	Impresión 3D	75h	\$ 2.50/h	\$ 187.50
Total				\$ 726.80

CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo de un sistema de control para múltiples brazos robóticos destinados a la manipulación y traslado de objetos fue una experiencia sumamente gratificante. Este proyecto no solo permitió aplicar los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Mecatrónica en el diseño de la propuesta, sino que también brindó la oportunidad de avanzar en la investigación de vehículos aéreos no tripulados. La integración de estas tecnologías facilita la gestión remota y eficiente de elementos en actividades masivas, lo que representa un avance significativo en la automatización y el control remoto en áreas críticas como el rescate, la asistencia y la seguridad ciudadana ecuatoriana en situaciones de catástrofe.

4.1.1 Conclusiones

Dentro de las actividades de rescate y traslado en situaciones de emergencia, el tiempo y la eficiencia son factores críticos. La capacidad para trasladar insumos médicos de manera segura en entornos de difícil acceso puede ser determinante para el destino de las víctimas. Por ello, el uso de un controlador adaptativo, que no solo garantice el traslado eficiente sino también la integridad del paquete representa un avance significativo. Esta tecnología permite una respuesta rápida y precisa, mejorando notablemente la efectividad de las operaciones de rescate y manejo en circunstancias adversas.

- Se logró diseñar un sistema de control híbrido en tiempo real para drones equipados con brazos robóticos, que integra un enfoque basado en esfuerzos con un control por posición. Este sistema ofrece múltiples ventajas, como la minimización de las perturbaciones causadas por vibraciones residuales y la reducción del margen de error a un 2%. Estas capacidades permiten una ejecución precisa y estable de las tareas críticas, garantizando la integridad y seguridad de los insumos médicos

durante su manipulación y traslado. El controlador híbrido en tiempo real mejora significativamente la eficacia operativa en situaciones de emergencia, asegurando un manejo más seguro y eficiente del equipo en contextos desafiantes como operaciones de rescate y asistencia.

- Se implementó físicamente un prototipo de brazo robótico especializado para drones de tamaño mediano, destacando varias innovaciones clave en su diseño. El sistema de transmisión de potencia utilizó engranajes y una correa sincrónica, lo que permitió que un único servomotor controlara la garra de sujeción con un factor de torque de hasta 2.44 veces. Esta configuración aseguró una distribución equilibrada de las fuerzas durante las actividades de agarre, mejorando la eficiencia y precisión del sistema. Además, se empleó un mecanismo de tornillo sin fin para distribuir la potencia entre servomotores, garantizando un control preciso del brazo de dos grados de libertad y asegurando la posición en tiempo real del elemento en cada instante de su funcionamiento. Finalmente, se utilizó impresión aditiva con materiales PLA y TPU, lo que permitió un agarre adaptativo a la forma del objeto sin comprometer la estructura del diseño. El prototipo también demostró una alta capacidad de escalabilidad, lo que facilita su adaptación a diferentes tamaños y aplicaciones, proporcionando una solución robusta y flexible para una variedad de contextos operativos.
- Se creó un aplicativo que no solo permite el control de un dron, sino también de múltiples drones para misiones que requieren una distribución o asistencia más especializada. Este sistema destacó por su interfaz de control fácil e intuitiva, aprovechando las librerías de código abierto de ArduPilot para simular y ejecutar

comandos tanto en drones simulados como físicos. La adaptación del código de interfaz facilitó la interacción simultánea con varios drones y brazos robóticos, lo que permitió el desarrollo de un sistema robusto y versátil. Esta capacidad de adaptación mejoró significativamente la eficacia en operaciones de rescate y en situaciones que demandan una coordinación más compleja y especializada.

4.1.2 Recomendaciones

- **Uso de Cámaras de Profundidad y LIDARs:**
 - Se recomienda la integración de cámaras de profundidad y sensores LIDAR para mejorar la navegación y evitar colisiones en el dron. Las cámaras de profundidad proporcionan una representación tridimensional del entorno, permitiendo al dron detectar y evitar obstáculos con mayor precisión. Los sensores LIDAR complementan esta funcionalidad al realizar escaneos rápidos y detallados del área circundante, creando mapas precisos que ayudan a establecer rutas seguras. La combinación de estas tecnologías facilita la definición de un área de vuelo segura basada en las dimensiones del dron, reduciendo el riesgo de colisiones y mejorando la seguridad durante operaciones en entornos complicados.
- **Uso de Materiales de Mayor Dureza:**
 - Se sugiere emplear materiales de mayor dureza para las partes críticas del brazo robótico, como metales para los engranajes y fibra de carbono para las piezas impresas en PLA. Los metales ofrecen una resistencia superior al desgaste y deformación, garantizando una mayor durabilidad en componentes sometidos a altas cargas. Por otro lado, la fibra de carbono

proporciona una combinación óptima de alta resistencia y bajo peso, lo cual es esencial para mantener el rendimiento del dron sin añadir peso innecesario. Esta selección de materiales contribuye a una mayor fiabilidad y eficiencia del sistema, asegurando un funcionamiento continuo y preciso en condiciones operativas exigentes.

- Facilitar la Integración de Elementos y Funcionalidades:
 - Se sugiere aprovechar la capacidad del sistema para integrar diversos componentes y funcionalidades, ya que el diseño actual facilita esta integración. Con esta ventaja, se recomienda explorar y desarrollar aplicaciones adicionales o proyectos complementarios que puedan beneficiarse de la flexibilidad del sistema. Al aprovechar la capacidad de integración del sistema, es posible incorporar nuevas tecnologías como visión por computadora y sistemas avanzados de identificación de objetos, así como desarrollar nuevas funcionalidades adaptadas a necesidades específicas. Esto no solo optimiza el uso del sistema actual, sino que también abre oportunidades para innovaciones y mejoras en futuros proyectos, maximizando el potencial del dron en diversas aplicaciones.
- Uso de Computadoras Especializadas:
 - Se aconseja utilizar computadoras especializadas para el desarrollo y la operación del sistema, en lugar de depender exclusivamente de máquinas virtuales. Las computadoras especializadas están diseñadas para manejar cargas de trabajo intensivas y ofrecer un procesamiento eficiente, lo que mejora la ejecución de algoritmos complejos y la gestión de recursos en

tiempo real. Invertir en una partición dedicada o en hardware físico específico puede incrementar significativamente el rendimiento del sistema, reduciendo tiempos de espera y mejorando la estabilidad. Esta inversión asegura una operación más fluida y efectiva del dron, optimizando su funcionamiento en aplicaciones críticas y exigentes.

Referencias

- [1] APD Pilotos, «APD Profesionales de Drones,» 5 mayo 2023. [En línea]. Available: <https://idc.apddrones.com/drones/monitoreo-con-drones/>.
- [2] A. Ollero, «RadioCable,» 24 abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.radiocable.com/sevilla-lider-dron-brazo-robotico429.html>.
- [3] R. Peco, «La Vanguardia,» 10 abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.lavanguardia.com/tecnologia/20180409/442384313967/los-drones-ya-tienen-brazos-y-la-universidad-de-sevilla-lidera-su-desarrollo.html#foto-4>.
- [4] S. Hassnain, N. Hamood, Y. Li, M. Alsharif y M. Khan, «Vehículos aéreos no tripulados (UAV): aspectos prácticos, aplicaciones, desafíos abiertos, cuestiones de seguridad y tendencias futuras,» 16 enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9841964/>.
- [5] M. A. lcda. Ocles Padilla, R. Ing. Peñaherrera León, C. V. Ing. Bermudez Quintana, M. Dr. Carvajal Ballesteros y D. Ing. Maigua Paredes, «PLAN NACIONAL DE RESPUESTA ANTE DESASTRES,» 2018.
- [6] A. Noboa, «Tragedia en Alausí: "Es una responsabilidad del Estado en su conjunto",» *Primicias*, 1 abril 2023.
- [7] Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Limón Indanza, «Portal Único De Trámites Ciudadanos,» 26 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.gob.ec/gadmclimon-indanza/tramites/servicio-alquiler-maquinaria>. [Último acceso: 01 Mayo 2024].

- [8] M. Gaspar, M. Zambrano, C. Paucar y G. Rivera, «El desabastecimiento de insumos médicos como vulneración del derecho a la salud,» *Revista Interdisciplinaria de Humanidades, Educación, Ciencia y Tecnología, Venezuela*, 2021.
- [9] E. Dias, «DYNATEC,» 24 enero 2021. [En línea]. Available: <https://dynatec.es/2021/01/24/los-drones-aportan-nuevas-soluciones-a-la-industria-4-0/>.
- [10] UMILES Group, «UMILES,» 3 noviembre 2022. [En línea]. Available: <https://umilesgroup.com/que-es-un-dron-y-para-que-sirve/>.
- [11] S. San Martín, «ABC de Sevilla,» 18 junio 2018. [En línea]. Available: https://www.abc.es/sevilla/ciudad/sevi-si-tenes-dron-estas-normas-para-poder-usarlo-201806181413_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.abc.es%2Fsevilla%2Fciudad%2Fsevi-si-tenes-dron-estas-normas-para-poder-usarlo-201806181413_noticia.html.
- [12] E. Díaz, «DYANTEC,» 24 enero 2021. [En línea]. Available: <https://dynatec.es/2021/01/24/los-drones-aportan-nuevas-soluciones-a-la-industria-4-0/>.
- [13] R. Holgado, «20minutos,» 3 octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.20minutos.es/tecnologia/moviles-dispositivos/3-maneras-en-que-los-drones-ayudan-a-salvar-el-planeta-frenan-el-contagio-de-enfermedades-y-conservan-fauna-y-flora-4836391/>.
- [14] R. Goldiez, «Universal Robots,» 29 diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.universal-robots.com/mx/blog/robots-manipuladores-funci%C3%B3n-principales-usos-y-ventajas/>.
- [15] J. A. Prados, «Telemedicina, una herramienta también para el médico de familia,» *Elsevier*, pp. 129-132, marzo 2013.

- [16 D. Ortego, «OpenWebinars,» 21 septiembre 2017. [En línea]. Available:
] <https://openwebinars.net/blog/que-es-ros/>.
- [17 C. Camas, «Diseño e Implementación de un brazo robótico teleoperado 3dof adaptado a un
] dron para manipulación y transporte de cargas livianas.,» Universidad Nacional de
Chimborazo, Riobamba, 2022.
- [18 Cruz Roja, «Cruz Roja España: Ahora,» 09 diciembre 2021. [En línea]. Available:
] <https://www2.cruzroja.es/web/ahora/-/drones-ambulancia-medicina-no-fronteras>.
- [19 C. Roja, Dirección, *DRONES: UN MIEMBRO MÁS EN LOS EQUIPOS DE BÚSQUEDA Y
] RESCATE DE PERSONAS*. [Película]. España: Cruz Roja España: Ahora, 2021.
- [20 D. Buenosvinos, «oksalud,» 20 julio 2023. [En línea]. Available:
] <https://okdiario.com/salud/madrid-completa-exito-primer-vuelo-drones-transporte-material-sanitario-11283732>.
- [21 Robotis, «Generation Robots,» 2024. [En línea]. Available:
] <https://www.generationrobots.com/en/403475-dynamixel-xc430-w240-t-servo-motor.html>.
- [22 Moviltronics S.A, «Moviltronics,» 2024. [En línea]. Available:
] <https://moviltronics.com/tienda/servo-mg995/>.
- [23 Poly-Tronics, «RCBank,» 2024. [En línea]. Available:
] https://www.rcbank.co.kr/shop/goods/goods_view.php?goodsno=15802.
- [24 ROBOTIS, «Aliexpress,» 2024. [En línea]. Available:
] <https://es.aliexpress.com/i/1005004428663371.html>.
- [25 ROBOTIS, «Mybot Shop,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.mybotshop.de/U2D2-ROBOTIS-DYNAMIXEL>.

[26 Raspberry Pi Ltd, «Raspberry Pi,» abril 2024. [En línea]. Available:
] <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf>.

Apéndice A

Figura 36

Github del proyecto

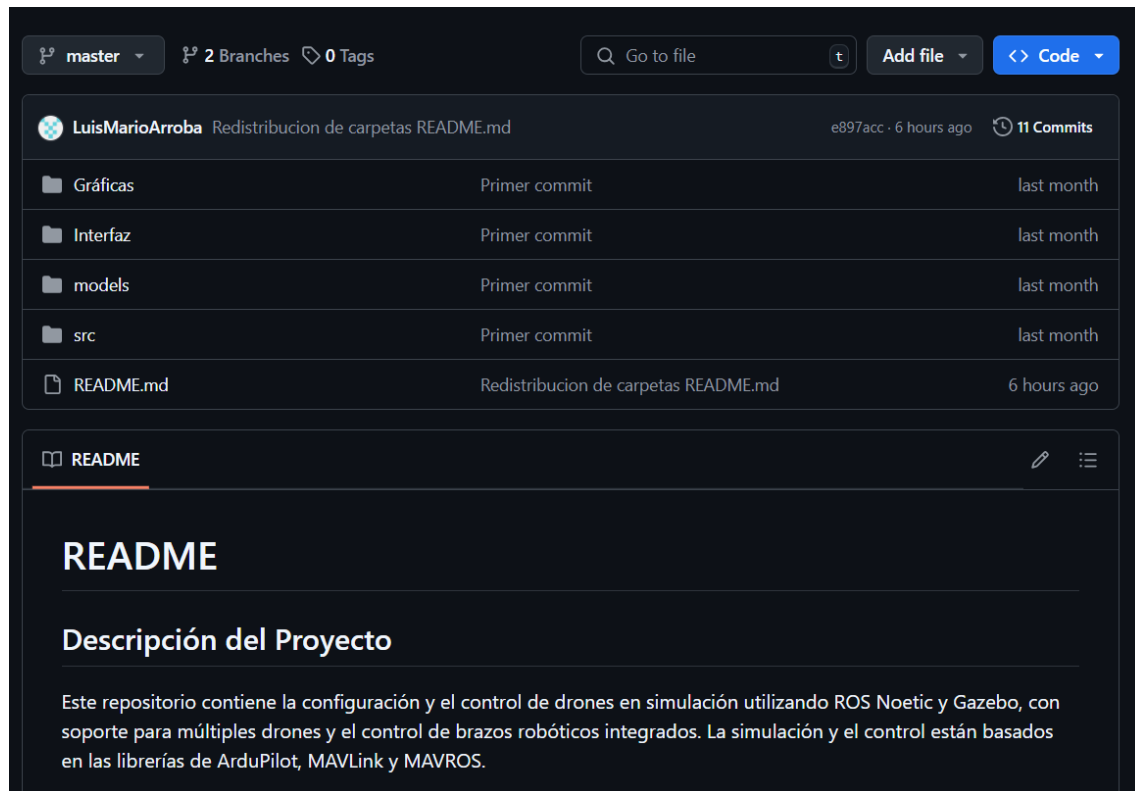


Figura 37

Planos mecánicos del prototipo

