

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**DISEÑO DE UNA PLATAFORMA AUTOMÁTICA DE
ASISTENCIA AL ATERRIZAJE DE MULTICÓPTEROS EN
EMBARCACIONES MARINAS.**

Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecatrónico, que presenta el bachiller:

Erick Jairo Lara Bendezú

ASESOR: Ing. Luis Ricardo Morales Pimentel

Lima, Octubre del 2018

DEDICATORIA



*A mis padres, Félix y Elvira,
pues gracias a ellos pude
realizar mi carrera universitaria
y porque siempre confiaron
en mí y me apoyaron en todo
momento.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ing. Luis Morales por todos sus consejos y su gran aporte al desarrollo y la revisión de la presente tesis, a la profesora Elizabeth Villota por su revisión de mi trabajo de fin de carrera y por compartir sus conocimientos en el diseño de control y a mis compañeros tesisistas por el apoyo mutuo que nos permitió culminar el trabajo de cada uno de manera satisfactoria.



RESUMEN

Los multicópteros en la actualidad son una herramienta de gran apoyo en distintos rubros tales como la prospección pesquera, la vigilancia y seguridad, la detección de personas, entre otros.

Sin embargo existe una situación problemática por la cual se ven afectados estos multicópteros, la cual es el daño o colisión que tienen al momento de aterrizar en superficies en movimiento, tal es el caso de las embarcaciones marinas, pues no están diseñados para el tipo de superficie mencionado anteriormente.

Por ello surge la necesidad de encontrar una solución para abordar este problema, frente a ello la propuesta de solución es una plataforma automática que asista al correcto aterrizaje de multicópteros que sean empleados en el ambiente marítimo.

En la presente tesis se desarrolla esta propuesta de solución, la cual está organizada en cinco capítulos. En el primer capítulo se aborda la situación problemática, el alcance del problema, las necesidades del usuario o instituciones, los objetivos de la tesis y el estado del arte donde se presentan tesis, patentes y productos que existen en el mercado.

A partir del segundo capítulo se empieza a realizar el proceso del diseño de ingeniería. En este capítulo se trata sobre la definición de los requerimientos que debe contar el sistema para cumplir con una lista de exigencias.

Posteriormente se presenta la estructura de funciones con que contara cada dominio del sistema mecatrónico (mecánico, electrónico y control), las matrices morfológicas las cuales presentan las alternativas de solución para cada una de las funciones que tendrá el sistema mecatrónico. Además, se realiza una evaluación técnico económico de las tres mejores soluciones para definir el diseño óptimo.

El tercer capítulo está conformado por el desarrollo e integración del sistema mecatrónico, que consta de un diagrama de bloques y se describe los componentes que conforman el diseño electrónico y los criterios de selección para escoger al adecuado, en cuanto a los cálculos electrónicos, estos se pueden observar en el anexo A.6. Seguidamente, el diseño mecánico abarca cálculos principales mecánicos cinéticos y de resistencia de materiales, mostrando las dimensiones y características principales del sistema mecatrónico, en el anexo A.7 se presentan los cálculos mecánicos adicionales del sistema.

El diseño de control contiene diagramas de flujo donde se muestra los algoritmos de control y el modelo matemático de los subsistemas, se plantea las estrategias de control con el fin de poder controlar eficientemente al sistema.

En el cuarto capítulo se aborda los costos que implica el desarrollo del sistema tales como los costos de los materiales, fabricación y de diseño en ingeniería.

Finalmente, el quinto capítulo constituye las conclusiones y recomendaciones que se desprenden del presente trabajo de diseño.

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR
EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

Título : Diseño de una plataforma automática de asistencia al aterrizaje de multicopteros en embarcaciones marinas.
Asesor : Ing. Luis Ricardo Morales Pimentel
Co-asesor :
Propuesto por : Ing. Luis Ricardo Morales Pimentel
Alumno : Erick Jairo Lara Bendezú
Código : 20111714
Tema N° : # 220
Fecha : 26/05/18



Descripción y Objetivos

El uso de multicopteros en la actualidad cumple muchas funciones tales como la vigilancia y seguridad, la detección de personas en desastres naturales e incluso detectar fallas o averías en plantas industriales. En el caso de las embarcaciones marinas se emplea fundamentalmente en vigilancia y prospección pesquera sin embargo para que los multicopteros aterricen en superficies en movimiento surgen dificultades, el método que más se suele utilizar es en el aterrizaje por control remoto y atrapar a los multicopteros manualmente.

En el presente trabajo se plantea el diseño de una plataforma que pueda asistir en el aterrizaje de los multicopteros en embarcaciones para evitar daños o colisiones tanto del multicopteros como hacia las personas. Para ello el sistema mecatrónico cuenta con sensores de proximidad y sensores de inclinación de tal forma que se pueda sujetar a los multicopteros y estabilizarse la plataforma. Además cuenta con dos mecanismos para la sujeción por medio de brazos sujetadores y para la estabilización cuenta con eslabones y servomotores de tal forma que se adapte la inclinación de la plataforma a la inclinación del multicoptero.

Otras funciones adicionales son el registro del tipo de cada uno de los multicopteros que aterricen y su estado de batería.

El documento se divide en cinco capítulos. En el primero se describe la problemática, el alcance, el estado del arte y los objetivos. En el segundo se describe los requerimientos del diseño junto con las funciones para llegar al concepto de solución óptimo. En el tercer capítulo se describe el desarrollo del sistema mecatrónico donde se abarca los tres dominios del sistema como el electrónico, el mecánico y el de control, además de realizar simulaciones. En el cuarto capítulo se aborda el tema de los costos que implican la implementación del sistema mecatrónico. Finalmente el quinto capítulo trata sobre las conclusiones y recomendaciones que se llegaron con este trabajo académico.

Máximo : 100 páginas

Erick J. Lara Bendezú



Luis Ricardo Morales Pimentel
LUIS RICARDO
MORALES PIMENTEL
INGENIERO MECATRONICO
Reg. CIP Nº 201424

INDICE DE CONTENIDO

Pág.

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
INDICE DE CONTENIDO	v
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE ILUSTRACIONES	ix
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: ANTECEDENTES	2
1.1 Situación problemática	2
1.2 Alcance del problema y necesidades de usuario	3
1.3 Objetivos del proyecto	4
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	4
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
1.4 Estado del arte	4
1.4.1 <i>Investigaciones de tesis y patentes</i>	4
1.4.2 <i>Productos en el mercado</i>	7
CAPITULO II: REQUERIMIENTOS Y DISEÑO CONCEPTUAL	9
2.1 Lista de exigencias.....	9
2.1.1 <i>Requerimiento general</i>	9
2.1.2 <i>Requerimientos mecánicos</i>	9
2.1.3 <i>Requerimientos eléctricos y electrónicos</i>	9
2.1.4 <i>Requerimientos de control y comunicación</i>	10
2.1.5 <i>Requerimientos adicionales</i>	10
2.2 Estructura de funciones	11
2.2.1 <i>Fijación de procesos técnicos</i>	11
2.2.2 <i>Estructura de funciones-Sistema de la plataforma</i>	12
2.2.3 <i>Estructura de funciones – Kit de multicoptero</i>	14
2.3 Matriz morfológica.....	15
2.4 Evaluación técnica y económica de los conceptos de solución	16
2.4.1. <i>Evaluación técnica</i>	16
2.4.2. <i>Evaluación económica</i>	16

2.5 Concepto de solución óptimo	17
CAPITULO III: DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO	19
3.1 Diseño electrónico	19
3.1.1 Diagrama de bloques	19
3.1.2 Componentes electrónicos	20
3.1.3 Diagrama esquemático	31
3.2 Diseño mecánico	34
3.2.1 Cálculos mecánicos	34
3.2.2 Proceso del ensamble general.....	42
3.2.3 Proceso de los subensambles del sistema.....	44
3.2.4 Proceso de fabricación de las piezas importantes	45
3.2.5 Simulaciones	49
3.3 Diseño de control.....	59
3.3.1 Diagrama de flujo del sistema	59
3.3.2 Estrategias de control del sistema	64
3.4 Integración del sistema mecatrónico.....	70
CAPITULO IV: COSTOS DEL SISTEMA	72
4.1 Costos de Materiales – Parte Electrónica	72
4.2 Costo de Materiales – Parte Mecánica	72
4.3 Costo de Fabricación de Piezas	73
4.4 Costo de diseño.....	73
4.5 Costo total.....	74
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de productos existentes en el mercado	8
Tabla 2.1 Representación de dominios en las matrices morfológicas para la Plataforma	15
Tabla 2.2 Representación de la matriz morfológica del Kit de multicoptero.....	15
Tabla 3.1 Requerimientos del sensor IMU	20
Tabla 3.2 Comparación entre sensores IMU.....	21
Tabla 3.3 Características adicionales del sensor LSM9DS0	21
Tabla 3.4 Requerimientos del sensor de ultrasonido	22
Tabla 3.5 Comparación entre sensores de ultrasonido	22
Tabla 3.6 Características adicionales del sensor HC-SR04.....	22
Tabla 3.7 Requerimientos mínimos para la cámara	23
Tabla 3.8 Comparación entre cámaras web.....	23
Tabla 3.9 Características adicionales de la cámara web C170	23
Tabla 3.10 Requerimientos del servomotor a seleccionar.....	24
Tabla 3.11 Comparación de servomotores	24
Tabla 3.12 Características adicionales del servomotor MCDDBS	25
Tabla 3.13 Requerimientos del controlador de la plataforma	25
Tabla 3.14 Comparación entre los microcontroladores del tipo Arduino.....	25
Tabla 3.15 Características complementarias del Arduino Uno	26
Tabla 3.16 Requerimientos de la minicomputadora para procesar imágenes	26
Tabla 3.17 Comparación entre mini computadoras.....	26
Tabla 3.18 Características adicionales del RaspBerry Pi 3	27
Tabla 3.19 Requerimientos del controlador del Kit de multicoptero.....	27
Tabla 3.20 Características complementarias del Arduino Nano	28
Tabla 3.21 Requerimientos del módulo de comunicación WIFI.....	28
Tabla 3.22 Comparación entre módulos de comunicación WIFI	28
Tabla 3.23 Características adicionales del módulo Esp8266	28
Tabla 3.24 Requerimientos de las baterías.....	29
Tabla 3.25 Características resaltantes de la batería FL121500	29
Tabla 3.26 Características resaltantes de la batería LiPo DBT	30
Tabla 3.27 Características resaltantes del Módulo cargador de Batería LiPo DBT ..	30
Tabla 3.28 Características resaltantes de la Fuente de Poder de 12V y 600 W.....	30
Tabla 3.29 Requerimientos del convertidor DC-DC elevador.....	31
Tabla 3.30 Características del convertidor elevador RC122430.....	31
Tabla 3.31 Medidas de longitud, masa e inercia de los eslabones de sujeción.....	36

Tabla 3.32 Datos para el cálculo de torque del conjunto de eslabones 1 y 2	36
Tabla 3.33 Datos para el cálculo de torque del eslabón 2.....	36
Tabla 3.34 Medidas de longitud, masa e inercia de los eslabones de estabilización	38
Tabla 3.35 Datos para el cálculo de torque del conjunto de eslabones 1,2 y 3	39
Tabla 3.36 Características del subensamble de eslabones de estabilización	49
Tabla 3.37 Características del pin de unión	51
Tabla 3.38 Características de la base superior	54
Tabla 3.39 Características del subensamble de sujeción.....	56
Tabla 4.1 Costo de componentes electrónicos y otros	72
Tabla 4.2 Costo de los componentes mecánicos.....	72
Tabla 4.3 Costo del proceso de manufactura implicado para la fabricación.....	73
Tabla 4.4 Costo total de la plataforma automática	74



INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.1 Aterrizaje de un drone de manera automática.....	3
Figura 1.2 Vista de diseño de la plataforma autónoma	5
Figura 1.3 Diseño de la patente.	5
Figura 1.4. Patrón de visión utilizado para el procesamiento de imágenes en la plataforma.....	6
Figura 1.5 Sistema de asistencia al aterrizaje de drones basado en GNSS.....	6
Figura 1.6 Plataforma DroneBox de la empresa H3Dynamics	7
Figura 1.7 Plataforma Airbase de la empresa Airobotics.....	7
Figura 1.8 Plataforma de aterrizaje WiBotic	8
Figura 2.1 Estructura de funciones del dominio electrónico	12
Figura 2.2 Estructura de funciones del dominio mecánico	13
Figura 2.3 Estructura de funciones del dominio de control.....	13
Figura 2.4 Estructura de funciones del Kit de multicoptero.	14
Figura 2.5 Gráfica de criterios económicos VS criterios técnicos	17
Figura 2.6 Concepto de Solución Óptimo	18
Figura 3.1 Diagrama de bloques de la plataforma.....	19
Figura 3.2 Diagrama de bloques del Kit del multicoptero	20
Figura 3.3 Sensor IMU LSM9DS0.....	21
Figura 3.4 Requerimiento de distancia del sensor de ultrasonido	22
Figura 3.5 Sensor de ultrasonido HC-SR04.....	22
Figura 3.6 Cámara web C170	23
Figura 3.7 Servomotor MCDBS	24
Figura 3.8 Microcontrolador Arduino Mega 2560	26
Figura 3.9 RaspBerry Pi 3.....	27
Figura 3.10 Microcontrolador Arduino Nano.....	27
Figura 3.11 Módulo de comunicación Wifi Esp8266.....	28
Figura 3.12 Batería FL121500	29
Figura 3.13 Batería LiPo DBT	30
Figura 3.14 a) Módulo cargador de Batería LiPo DBT Figura 3.14 b) Fuente de Poder de 12V y 600 W.....	30
Figura 3.15 Convertidor elevador RC122430.....	31
Figura 3.16 Reguladores de tensión de 5V y 3.3V	32
Figura 3.17 Conversión de voltaje DC-DC elevador.....	32
Figura 3.18 Conexión entre los sensores de plataforma, el controlador y el procesador de imagen	33

Figura 3.19 Conexiones del módulo de comunicación Wifi	33
Figura 3.20 Conexión entre sensores con el controlador dentro del Kit de multicóptero	34
Figura 3.21 Modelo cinemático del gripper	34
Figura 3.22 Modelo cinemático de los eslabones de estabilización	37
Figura 3.23 DCL de la plataforma con las reacciones de cada par de eslabones. ...	39
Figura 3.24 DCL de un par de eslabones	40
Figura 3.25 DCL de eslabones sometidos a pandeo.....	41
Figura 3.26 Vista isométrica del prototipo	42
Figura 3.27 Vista horizontal de la plataforma automática.....	43
Figura 3.28 Vista de perfil de la plataforma automática	43
Figura 3.29 Vista frontal de la plataforma automática	44
Figura 3.30 Subsistema de sujeción	44
Figura 3.31 Subsistema de estabilización	45
Figura 3.32 Base superior o Base móvil	46
Figura 3.33 Base inferior o Base fija	47
Figura 3.34 Placa de unión base móvil con eslabones de estabilización	47
Figura 3.35 Canales guía para eslabones de estabilización	48
Figura 3.36 Eslabón de estabilización.....	48
Figura 3.37 Fuerzas aplicadas al subensamble	49
Figura 3.38 Esfuerzo máximo de Von Mises en subensamble	50
Figura 3.39 Máxima deformación del subensamble	50
Figura 3.40 Factor de seguridad del subensamble	51
Figura 3.41 Fuerza distribuida que actúa sobre el pin de unión	52
Figura 3.42 Esfuerzo máximo de Von Mises en el pin de unión	52
Figura 3.43 Máxima deformación o desplazamiento del pin de unión	53
Figura 3.44 Factor de seguridad del pin de unión	53
Figura 3.45 Fuerzas que actúan sobre la base superior	54
Figura 3.46 Esfuerzo máximo de Von Mises en la base superior	55
Figura 3.47 Máxima deformación de la base superior.....	55
Figura 3.48 Factor de seguridad de la base superior	56
Figura 3.49 Fuerzas que actúan sobre el subensamble de sujeción	57
Figura 3.50 Esfuerzo máximo de Von Mises del subensamble de sujeción	57
Figura 3.51 Máxima deformación o desplazamiento del subensamble de sujeción.	58
Figura 3.52 Factor de seguridad del subensamble de sujeción.....	58

Figura 3.53 a) Diagrama de Flujo General de la Plataforma b) Función Iniciar sistema c) Subrutina de Interrupción “Cambio de Valor”	59
Figura 3.54 a) Función Iniciar proceso de aterrizaje b) Función secundaria Estabilización y sujeción preliminar c) Función secundaria Sujetar multicoptero.....	60
Figura 3.55 a) Subrutina de interrupción Cambio de Valor Inclinación b) Subrutina de interrupción Cambio de Valor Distancia	61
Figura 3.56 a) Función secundaria Estabilización y aterrizaje definitivo b) Función secundaria Adquisición de parámetros de multicoptero	62
Figura 3.57 a) Diagrama de flujo general del kit de multicoptero.....	63
Figura 3.58 Diagrama de bloques de lazo cerrado del mecanismo de estabilización	66
Figura 3.59 Respuesta de la salida del sistema de control de estabilización	67
Figura 3.60 Diagrama de bloques de control de brazo sujetador	68
Figura 3.61 Respuesta del sistema de control del brazo sujetador	69
Figura 3.62 Sistema mecatrónico	70



INTRODUCCIÓN

Los multicopteros en la actualidad tienen problemas al aterrizar en superficies en movimiento, en particular en embarcaciones marinas pues no han sido diseñados para dicho tipo de superficie y al momento de realizar su aterrizaje se produce daños en éstos, esta situación problemática se detalla posteriormente en el capítulo 1.

Frente a lo mencionado anteriormente, surge la necesidad principal de contar con un sistema que pueda asistir a distintos tipos de multicopteros en ambientes en los cuales no están aptos para aterrizar tales como las embarcaciones marinas. Otra necesidad es que los municipios requieren estandarizar el empleo de sistemas que ayuden al aterrizaje de multicopteros de manera que se otorgue licencias de uso de multicopteros a personas y empresas de distintos rubros como el pesquero y el de seguridad y vigilancia.

Debido a estas necesidades se propone el desarrollo de la siguiente tesis, con el fin de poder solucionar la situación problemática y satisfacer las necesidades.

En la presente tesis se desarrolla los aspectos principales que involucran el diseño de un sistema mecatrónico los cuales están divididos en cinco capítulos, se inicia con los antecedentes del diseño realizando un análisis de la problemática y el estado del arte. Posteriormente se procede con los requerimientos que solicita el sistema mecatrónico representándolo mediante estructura de funciones, matrices morfológicas y evaluación técnico - económico para obtener el concepto de solución óptimo.

Una vez realizado se desarrolla el diseño mecatrónico involucrando los tres aspectos que lo conforman tales como el mecánico, electrónico y control. Finalmente se menciona los costos de materiales, diseño y fabricación que implican realizar el presente sistema mecatrónico y las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron de realizar este trabajo de diseño de un sistema mecatrónico.

CAPITULO I: ANTECEDENTES

En el presente capítulo se presenta la problemática existente que da la motivación al desarrollo del diseño del proyecto. Además, se define el alcance de la tesis, los objetivos de la tesis, el estado del arte y los requerimientos.

1.1 Situación problemática

Una herramienta relativamente actual de la tecnología para apoyar en distintas actividades tales como la fotografía, el periodismo, el mantenimiento en tomas de alta tensión y la vigilancia, es el empleo de drones o multicopteros [1], los cuales son capaces de realizar acciones de vuelo y aterrizaje de forma manual y/o automática. Además, cuentan con cámaras que les permite grabar en tiempo real, desde el entorno aéreo, grandes extensiones de terreno en poco tiempo, además realizan vuelos de vigilancia perimetral.

Adicionalmente algunos drones cuentan con cámaras de visión térmica y nocturna que les permite realizar búsqueda de personas y también son empleados para encontrar defectos o fallas en instalaciones o plantas de grandes extensiones.

En el caso de las embarcaciones marinas se utiliza los drones para vigilancia de pesca ilegal y para la prospección pesquera por parte de empresas pesqueras de manera que se pueda ubicar y tomar fotos de zonas donde se encuentran cardúmenes para su pesca.

Sin embargo, existen distintos problemas que presentan los multicopteros tales como una baja autonomía de 30 a 45 minutos en la mayoría de estos. Además, los drones tienen problemas para aterrizar en superficies no estáticas pues la tasa de aterrizajes fallidos, en ambientes no terrestres como las embarcaciones marinas, sin intervención humana, es alta [1] ya que no aterrizan en un lugar en específico producto del movimiento en el entorno de la embarcación marina.

Otro problema a considerar es la falta de información del estado del multicoptero, es decir su autonomía o duración de la batería de éste. Aún más importante está el problema del riesgo de lesiones físicas por parte de los operarios al querer manipular a los drones y forzarlos a que aterricen correctamente en un lugar en particular dentro de la embarcación marina. Ver Figura 1.1.

Las soluciones existentes frente al problema de la autonomía principalmente tienen que ver con la recarga y/o reemplazo de baterías cuando aterriza el multicoptero en una plataforma. La desventaja es que estas plataformas de aterrizaje están diseñadas para superficies estáticas, es decir terrestres. Por lo tanto, este tipo de solución no sería aplicable para el caso de embarcaciones marinas.



Figura 1.1 Aterrizaje de un dron de manera automática.

Fuente:<http://defensanacional.argentinaforo.net/t671p15-marina-francesa>

1.2 Alcance del problema y necesidades de usuario

En el ambiente marítimo si bien es cierto que los drones pequeños pueden ser cogidos con la mano por un operario, esto no es posible de realizar para drones de mayores dimensiones que requieren de superficies de mayor extensión.

Las principales necesidades que presenta el usuario o cliente son, en primer lugar, disponer de una plataforma automática que asista al dron para un aterrizaje correcto en embarcaciones marinas, es decir sin daños ni colisiones. De esta forma se conserva en mejor estado a los multicopteros y se apoya en la actividad de vigilancia frente al ingreso de embarcaciones pesqueras extranjeras [2]

Por otro lado, otra necesidad importante es conocer el estado en el que se encuentra el multicoptero en cuanto a su tipo y principalmente la autonomía que tiene al momento de aterrizar, y tener dicha información del estado almacenada en un dispositivo móvil o en una estación de trabajo. La razón de conocer dicha información es contar con un registro o base de datos de los multicopteros que aterricen en las embarcaciones.

Por otro lado, los interesados también son los municipios que desean contar con un sistema para que se realice de manera adecuada las actividades de prospección pesquera y vigilancia en el ambiente marino y de esta forma poder darles una licencia para utilizar multicopteros a las personas y empresas que realicen dichas actividades, esto con el fin de prevenir daños o colisiones en los multicopteros y malas prácticas de aterrizaje. [3]

Finalmente, los usuarios que cuenten con su propia embarcación marina para realizar la pesca requieren de un sistema eficiente, de calidad y con el menor costo posible pues existen casos de multicopteros que son estropeados por su mal aterrizaje, por ende requieren prevenir estos casos. [3]

Actualmente se cuenta con patentes de plataformas para este tipo de superficie, pero estas no aseguran un correcto aterrizaje pues no sujetan al multicoptero, es por este motivo que se plantea el diseño de una plataforma automática que sea capaz de brindarle asistencia al drone para su correcto aterrizaje sin colisiones en embarcaciones marinas, evitándose lesiones físicas hacia el operario y mejorando la calidad de las actividades de vigilancia y prospección pesquera.

1.3 Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general es diseñar una plataforma automática de asistencia de aterrizaje de tal manera que asegure el correcto aterrizaje de los multicopteros evitándose daños y colisiones a éstos y también evitando malas prácticas de aterrizaje que produzcan lesiones físicas para los operadores de multicopteros [4] [5].

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Definir los requerimientos del diseño del sistema considerando aspectos mecánicos, electrónicos, de procesamiento de datos y otros.
- b) Realizar diversos diseños conceptuales que permitan concebir un diseño conceptual definitivo.
- c) Diseñar la estructura mecánica que permita soportar el peso del drone en el momento de descenso.
- d) Seleccionar los dispositivos electrónicos necesarios que aseguren un correcto aterrizaje sin daños que perjudiquen al drone.
- e) Establecer las estrategias de control más adecuadas para que la plataforma esté automatizada.
- f) Determinar los costos totales del proyecto, es decir los costos de diseño y de fabricación de la plataforma automatizada.

1.4 Estado del arte

1.4.1 Investigaciones de tesis y patentes

Carga autónoma de un multicoptero al aterrizar en una plataforma móvil

Tesis para título universitario que fue realizada en la Universidad de Ljubjana en Eslovenia por Anzel Rezelj en el 2013 [6]. En este tema de tesis se busca poder solucionar el problema de ciertos multicopteros de poseer baterías pesadas al reemplazarlas por baterías ligeras y de contar con una plataforma autónoma que permita la carga de dichas baterías al momento de que el multicoptero aterriza en la plataforma. Se emplea visión por computadora para que pueda aterrizar correctamente el multicoptero. En la Figura 1.2 se muestra una vista de diseño de dicha plataforma.

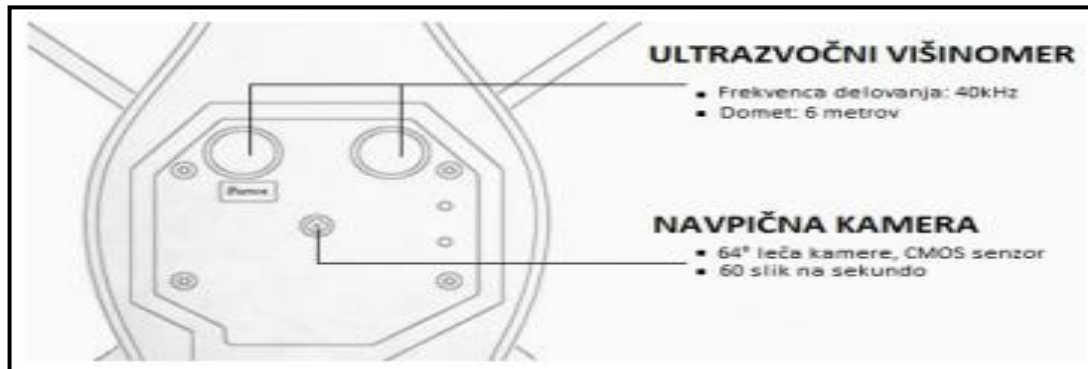


Figura 1.2 Vista de diseño de la plataforma autónoma. Fuente: Tesis [6]

Sistema para guiar a un dron durante su aproximación a una plataforma naval

Patente acerca de un sistema de guía a un dron que se caracteriza por tener una plataforma equipada con una instalación que indica la pendiente de planeo que emite haces ópticos de guía sobre un sector angular desde la horizontal, además de contar con un dron equipado con una cámara de adquisición de haz conectado a un procesador de imágenes de manera que controla el pilotaje automático del dron haciéndolo seguir al haz de luz [7]. En la Figura 1.3 se aprecia el diseño del sistema de guía para el dron al aterrizar en una plataforma naval.

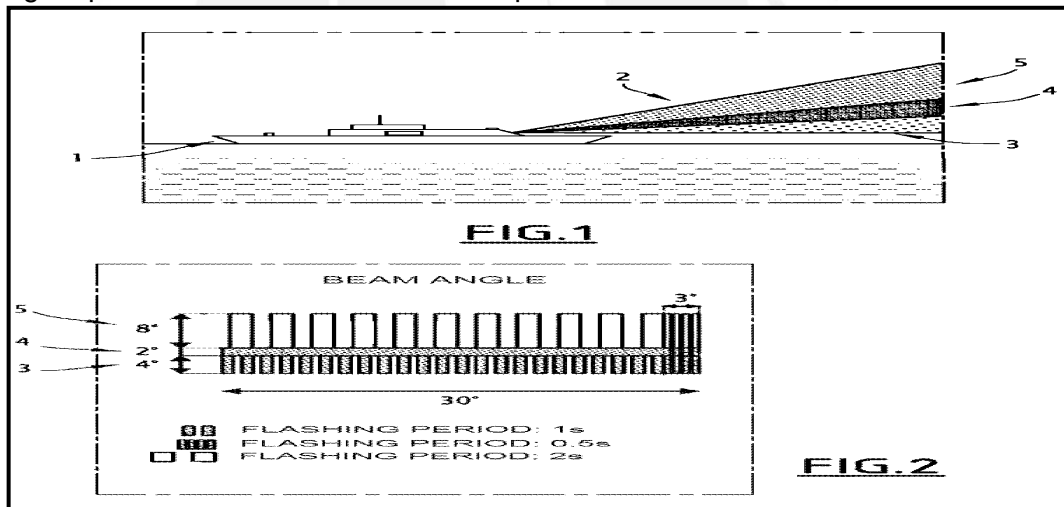


Figura 1.3 Diseño de la patente. Fuente: Patente [7]

Desarrollo de un sistema de aterrizaje autónomo sobre una plataforma de carga para un UAV tipo Parrot AR. Drone

Tesis para título universitario que fue realizada en la Universidad Politécnica de Madrid por Marcos Gil Fernández en el 2016. En este tema de tesis se busca que un dron aterrice de manera autónoma en una posición en concreto. La tesis se basa en dos procesos cíclicos, uno de visión y otro de control. El aterrizaje se desarrolla en tres pasos, un movimiento horizontal hasta detectar un patrón, la orientación de la posición del UAV (drone) hasta un ángulo óptimo y el descenso manteniendo la orientación y localización hasta alcanzar la plataforma de carga [8]. En la Figura 1.4

se muestra el patrón de visión que se utilizó para el procesamiento de imágenes en la plataforma.



Figura 1.4. Patrón de visión utilizado para el procesamiento de imágenes en la plataforma.
Fuente: Tesis [8]

Sistema global de navegación por satélite para la asistencia al aterrizaje de drones

Proyecto académico realizado por los catedráticos Manuel García y Daniel Gómez de la Universidad de Vigo en el año 2016. Este proyecto consiste en un sistema de apoyo al aterrizaje por medio de un radar pasivo o biestático, que en lugar de emitir señales aprovecha las señales emitidas por el sistema de navegación europeo y el americano, es decir el sistema Galileo y el sistema GPS respectivamente. Se caracteriza por ser ligero y de bajo consumo y está orientado a poder ayudar a aterrizar a los drones en circunstancias desfavorables como neblina o humo, en la oscuridad e inclusive en superficies en movimiento. [9] En la figura 1.5 se observa el sistema de asistencia al aterrizaje mencionado.

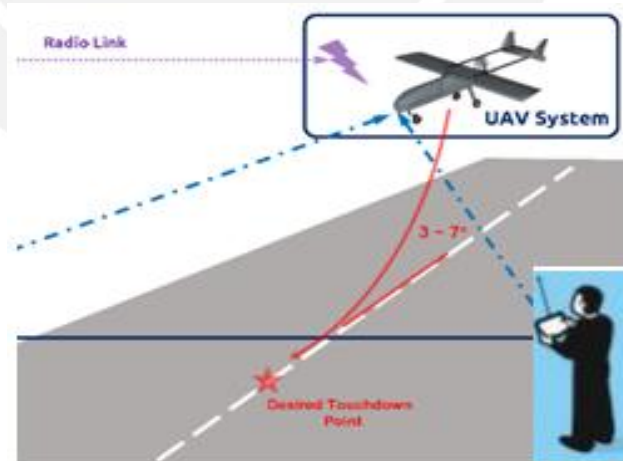


Figura 1.5 Sistema de asistencia al aterrizaje de drones basado en GNSS. Fuente: [9]

1.4.2 Productos en el mercado

1.4.2.1 DRONEBOX

Este producto es un centro de comando de un drone y además carga las baterías de estos por medio de la energía solar, con un diseño robusto ideado para ambientes con condiciones climáticas adversas y para zonas remotas, además de transferir imágenes e y data por medio de sensores hacia un servidor para el procesamiento y obtención de información. [10] En la figura 1.6 se observa la plataforma DroneBox donde ha aterrizado un drone quadcopter.



Figura 1.6 Plataforma DroneBox de la empresa H3Dynamics. Fuente: [10]

1.4.2.2 AIRBASE

Actualmente existe en el mercado esta plataforma de la empresa Airobotics la cual permite a los clientes ejecutar muchas misiones para que la realicen los drones especialmente del tipo vigilancia y de inspección de grandes instalaciones industriales, además es capaz de cambiar la batería de los drones y saber en qué estado se encuentra el drone por medio de sensores [11]. En la figura 1.7 se observa la plataforma mencionada.



Figura 1.7 Plataforma Airbase de la empresa Airobotics. Fuente: [11]

1.4.2.3 WIBOTIC POWER PAD

La presente plataforma de la empresa WiBotic se encarga de recargar las baterías de los multicopteros de forma inalámbrica. Tiene como objetivo servir como un punto de escala para multicopteros que realicen recorridos largos de más de 20 km. Mide 0.9 metros de largo y ancho con una altura de 0.3 metros. Además, se caracteriza por ser resistente a la intemperie y de un montaje sencillo pudiéndose realizar en cualquier lugar [12]. En la figura 1.8 se observa la plataforma descrita anteriormente.



Figura 1.8 Plataforma de aterrizaje WiBotic. Fuente: [12]

Para resumir haciendo una comparación de las características más resaltantes de los productos que existen en el mercado se presenta la siguiente tabla 1.

Tabla 1. Comparación de productos existentes en el mercado. Fuente: Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS	PRODUCTOS		
	DRONEBOX	AIRBASE	WIBOTIC POWER PAD
Forma de cargar baterías	Carga por conexión con una batería interna en la plataforma	Reemplazo de baterías del multicoptero	Inalámbrica
Condiciones climáticas	Adversas	Adversas	Normales
Funciones adicionales	Transmisión de imágenes captadas por el multicoptero	Sensado del estado del multicoptero	Ninguna
Montaje	Muy complejo	Regular complejidad	Sencillo
Diseño	Regular ergonomía	Regular ergonomía	Muy ergonómico
Costo (\$/.)	23,170.40	20,322.59	16,171.91

Como se mencionó anteriormente, si bien es cierto que existen patentes estas no son empleadas pues carecen de la sujeción del multicoptero, motivo por el cual se concluye que se requiere de un sistema que asista al multicoptero a una correcta sujeción y aterrizaje en embarcaciones marinas.

CAPITULO II: REQUERIMIENTOS Y DISEÑO CONCEPTUAL

La metodología para el diseño de un sistema empieza con los requerimientos y los diseños conceptuales, para esto se presentó el estado del arte el cual consiste en investigaciones como tesis, papers y productos que están en el mercado.

En este capítulo se definen los requerimientos mecánicos, electrónicos, de control y otros adicionales que debe de cumplir el sistema. Además, se presenta la estructura de funciones, la matriz morfológica, el planteamiento de los conceptos de solución junto con su evaluación respectiva y finalmente la optimización del concepto de solución.

2.1 Lista de exigencias

A continuación, se detalla primeramente el requerimiento general y posteriormente los demás requerimientos mecánicos, eléctricos-electrónicos, de control y comunicación y otros aspectos adicionales.

2.1.1 Requerimiento general

La función principal de este sistema mecatrónico es garantizar la asistencia para un correcto aterrizaje de un multicoptero por medio de una plataforma autónoma ubicada en una embarcación marina para que no tenga inconvenientes como colisiones ni otros daños, energizándose por medio de una batería y que sea capaz de asistir a distintos tipos de multicopteros. Para facilitar la comprensión de la lista de exigencias, se define (E) y (D) como exigencias y deseos respectivamente.

2.1.2 Requerimientos mecánicos

- (E) El sistema constará de una estructura que no deberá sobrepasar los 15 kg de peso, puesto que el peso de los multicopteros en promedio oscila entre 1 y 4 kg.
- (D) El sistema debe albergar y proteger todos los componentes eléctricos y electrónicos, es decir contar con un grado de protección IP-56.
- (E) La plataforma automatizada no deberá exceder de las siguientes dimensiones: 50 cm de altura, 1.1 m de largo y 1.1 m de ancho, pues las dimensiones en promedio de los multicopteros son menores a estas.
- (E) El montaje y desmontaje de la plataforma deberá ser de la manera más sencilla posible además de poder tener un fácil contacto con los componentes eléctricos y electrónicos.
- (E) El sistema contará con un mecanismo que le permita permanecer estable a pesar del movimiento oscilante de la embarcación marina.
- (E) El sistema dispondrá de un mecanismo para poder realizar el aterrizaje del multicoptero en un lugar en específico de la plataforma.

2.1.3 Requerimientos eléctricos y electrónicos

- (E) El sistema deberá contar con sensores que faciliten la estabilización y sujeción del multicoptero.
- (E) El sistema deberá energizarse con alimentación eléctrica proporcionada por una batería con una autonomía de tres horas.

- (D) Debe tener un bajo consumo de energía eléctrica.
- (E) Debe contar con actuadores para que la plataforma permanezca horizontal a pesar del movimiento oscilante de la embarcación marina además de poder inclinarse de la misma forma que el multicoptero.
- (E) Debe contar con un actuador que permita sujetar o coger al multicoptero para llevarlo al lugar en específico de aterrizaje en la plataforma.
- (E) El sistema deberá contar con un microcontrolador para que realice las operaciones de sujeción, de estabilización de la plataforma y para obtener información sobre el estado de batería del multicoptero
- (D) El sistema debe contar con un procesador de video y una cámara para que pueda realizar el procesamiento de la imagen del multicoptero con el fin de poder identificar el tipo de multicoptero que ha aterrizado.
- (E) El sistema deberá indicar el momento en que inicia y termina el proceso de asistencia de aterrizaje automatizado.

2.1.4 Requerimientos de control y comunicación

- (D) Este sistema también contará con un algoritmo de control en base al sensado de detección para proceder a pedir el envío de información de la ubicación del multicoptero.
- (E) El sistema contará con un algoritmo de control para poder realizar la operación de sujeción en base a la detección y otro algoritmo de control para la estabilización en base a la inclinación de la embarcación marina.
- (E) La plataforma contará con comunicación inalámbrica entre ésta y el multicoptero para el envío y recepción del porcentaje de batería con que cuenta el multicoptero.
- (E) Toda la información obtenida deberá ser enviada a una estación de trabajo desde la plataforma.
- (D) El sistema contará con un algoritmo de visión por computadora para determinar el tipo de multicoptero que aterrizará.

2.1.5 Requerimientos adicionales

- (D) El costo de la fabricación total del sistema debe ser de bajo costo (20,000 a 30,000 soles).
- (D) El mantenimiento del sistema deberá de realizarse una vez al año.
- (D) El sistema debe generar un bajo impacto ambiental.
- (E) Se debe garantizar en su diseño que se cumpla las normas de seguridad.

Toda esta información se manifiesta de manera completa en el Anexo A.1.

2.2 Estructura de funciones

En la estructura de funciones se hace un listado de las funciones o procesos técnicos que realizará el sistema para cumplir su objetivo. Esta información también se muestra de forma esquemática acerca de las funciones que realizara el sistema en general mediante la caja negra (Black Box). Posteriormente se muestra las funciones de manera general agrupando a todos los dominios en un solo diagrama.

La estructura de funciones se divide en dos sistemas, uno para la plataforma y el otro para la base remota, además de un subsistema de ayuda para el sistema de la plataforma (kit de multicoptero el cual es electrónicamente independiente del multicoptero, pero acoplado a este).

2.2.1 Fijación de procesos técnicos

- a) Alimentar al sistema con energía eléctrica DC.
- b) Regular el voltaje de alimentación para cada uno de los componentes electrónicos que los requiera.
- c) Generar una señal de activación de proceso de aterrizaje en base al requerimiento de usuario.
- d) Recibir señal de detección para corroborar la presencia del multicoptero.
- e) Comunicarse con el kit del multicoptero para recibir información del sensor de inclinación que está dentro de dicho kit.
- f) Estabilizar la plataforma en base a un algoritmo de control comparando la señal de inclinación de la plataforma y la señal de inclinación de un kit que irá en los soportes del multicoptero.
- g) Comunicarse con el kit del multicoptero para recibir la información de los sensores de distancia ubicados en las patillas de dicho multicoptero.
- h) Sujetar al multicoptero en base a un algoritmo de control basado en la comparación de la distancia de los soportes del multicoptero hacia la plataforma y la distancia de la plataforma hacia los soportes del multicoptero.
- i) Estabilizar la plataforma en base a una señal de referencia de manera que alcance una orientación horizontal.
- j) Aterrizar al multicoptero sujetado en la zona de aterrizaje.
- k) Adquirir una imagen procesada que de información acerca del tipo de multicoptero que va a aterrizar (quadcopter, hexacopter).
- l) Comunicarse con el multicoptero para conocer estado de batería.
- m) Enviar la información de que se ha terminado el aterrizaje, además de enviar el tipo de multicoptero que ha aterrizado junto con el porcentaje de batería que tiene el multicoptero a una estación remota dentro de la embarcación marina.

2.2.2 Estructura de funciones-Sistema de la plataforma

Las siguientes entradas y salidas corresponden al presente sistema y se mencionan a continuación.

- Entradas:
 - Señal de referencia horizontal. **(Señal de entrada)**
 - Señal de requerimiento de aterrizaje. **(Señal de entrada)**
 - Señal de información de distancia 1. **(Señal de entrada)**
 - Señal de información de inclinación 1. **(Señal de entrada)**
 - Multicóptero. **(Materia de entrada)**
 - Plataforma. **(Materia de entrada)**
 - Energía Eléctrica. **(Energía de entrada)**
- Salidas:
 - Señal de referencia horizontal procesada. **(Señal de salida)**
 - Señal de requerimiento atendida. **(Señal de salida)**
 - Señal visual de información. **(Señal de salida)**
 - Multicóptero aterrizado. **(Materia de salida)**
 - Plataforma estabilizada. **(Materia de salida)**
 - Plataforma protegida. **(Materia de salida)**
 - Calor, ruido. **(Energía de salida)**

El sistema de la plataforma se encuentra conformado por dominios. A continuación, se describe las funciones principales de cada dominio mencionado.

Electrónico

Como se aprecia en la figura 2.1 la función de energizar y regular voltaje reciben energía eléctrica. La función de comunicar es el que recibe señales de información y envía otras señales de información. La función de capturar y transmitir imagen recibe como entrada al multicóptero y procesa la imagen enviando una señal visual de la imagen procesada. A partir de la energía se libera calor y ruido.

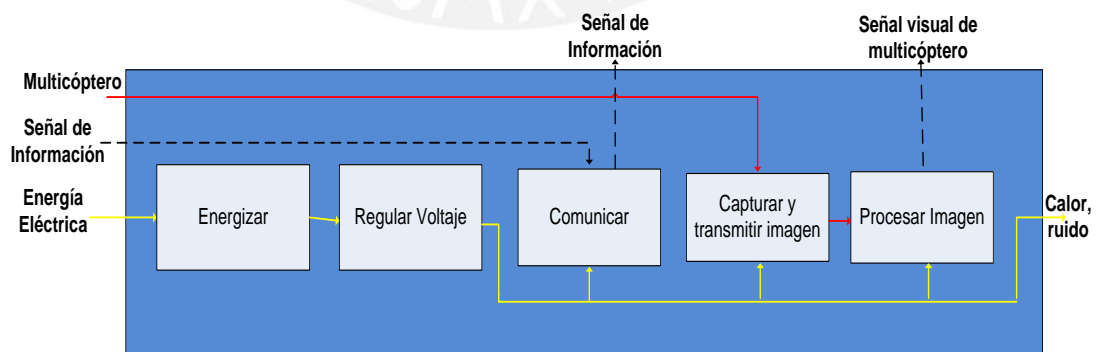


Figura 2.1 Estructura de funciones del dominio electrónico. Fuente: Elaboración propia

Mecánico

Como se observa en la figura 2.2 la función de mover mecanismo de sujeción y la función de mover mecanismo de estabilización reciben las tres entradas, la señal de información, la energía eléctrica y el multicoptero, se transmite la potencia tanto para sujetar como para estabilizar y finalmente se sujeta y estabiliza obteniéndose el multicoptero estabilizado y sujetado. Por otro lado se protege ante la vibración y la humedad al multicoptero y a la plataforma.

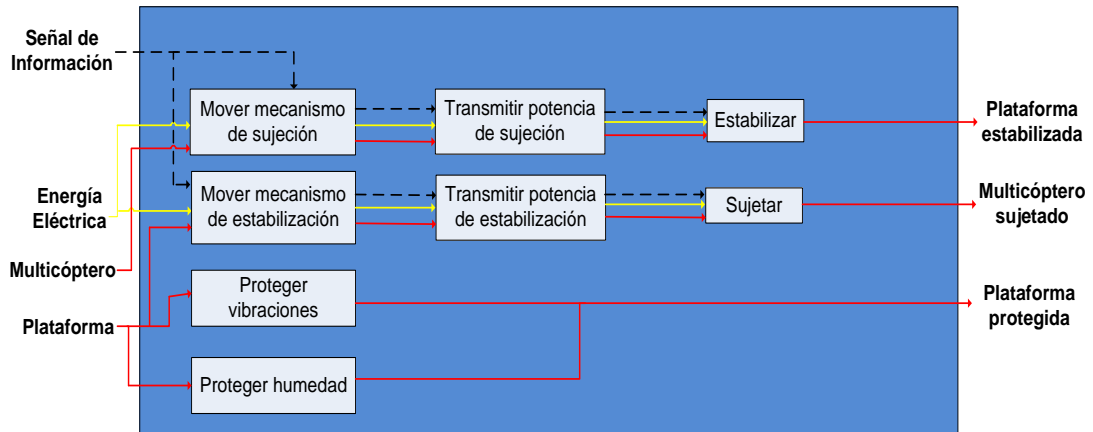


Figura 2.2 Estructura de funciones del dominio mecánico. Fuente: Elaboración propia

Control

Como se muestra en la figura 2.3, la función de sensor inclinación y la función de sensor distancia reciben las entradas de energía eléctrica y el multicoptero, generando señales que pasan a la función de controlar procesos que también recibe la señal de referencia horizontal y la señal de información del kit del multicoptero, a partir de ello genera las señales de control para la sujeción y para la estabilización, luego transmite la información hacia la función mostrar información que genera una señal visual de la información del multicoptero aterrizado.

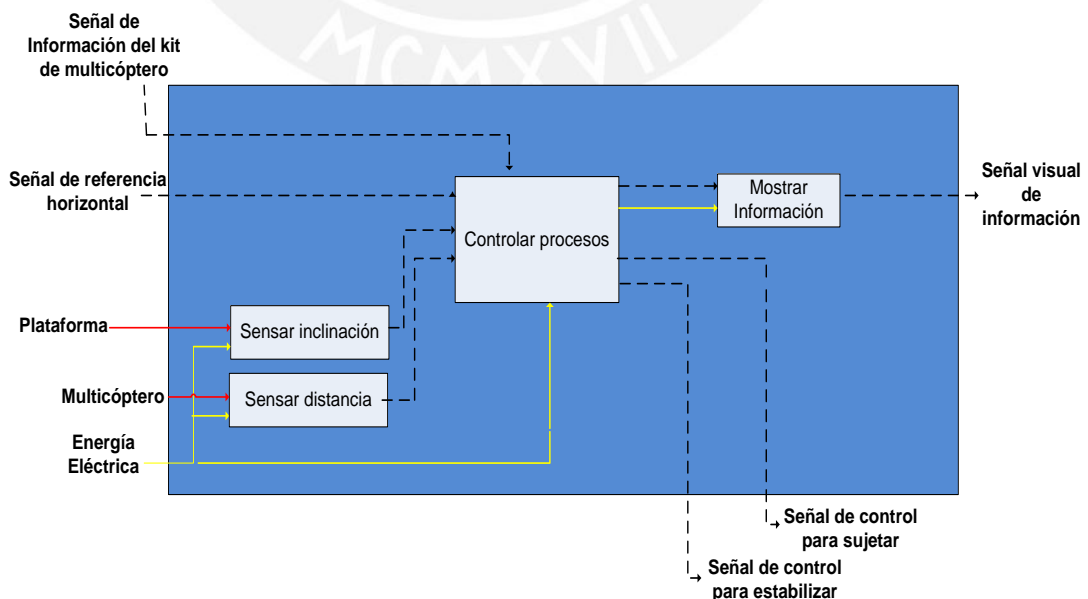


Figura 2.3 Estructura de funciones del dominio de control. Fuente: Elaboración propia

2.2.3 Estructura de funciones – Kit de multicoptero

Las siguientes entradas y salidas corresponden al presente sistema y se mencionan a continuación.

- Entradas:
 - Señal de plataforma. **(Señal de entrada)**
 - Señal de multicoptero. **(Señal de entrada)**
 - Energía Eléctrica. **(Energía de entrada)**
- Salidas:
 - Señal de información de distancia 2. **(Señal de salida)**
 - Señal de información de inclinación 2. **(Señal de salida)**
 - Calor, ruido. **(Energía de salida)**

A continuación, se describe las funciones del kit de multicoptero que se aprecia en la figura 2.4, la función de sensar inclinación recibe como entrada la señal de multicoptero para poder recibir información sobre su inclinación, la función de sensar distancia recibe como entrada la señal de la plataforma para poder recibir información sobre su distancia respecto al multicoptero, estos datos son procesados mediante la función procesar y luego pasan a ser transmitidos por medio de la función comunicar, además la función procesar recibe como entradas la señal de referencia horizontal y una señal de información la cual es procesada y comunicada para generar la señal de requerimiento de aterrizaje. En cuanto a la función energizar, recibe la energía eléctrica, luego pasa a energizar a la función procesar y regula su voltaje para energizar a la función comunicar obteniéndose como salida calor y ruido.

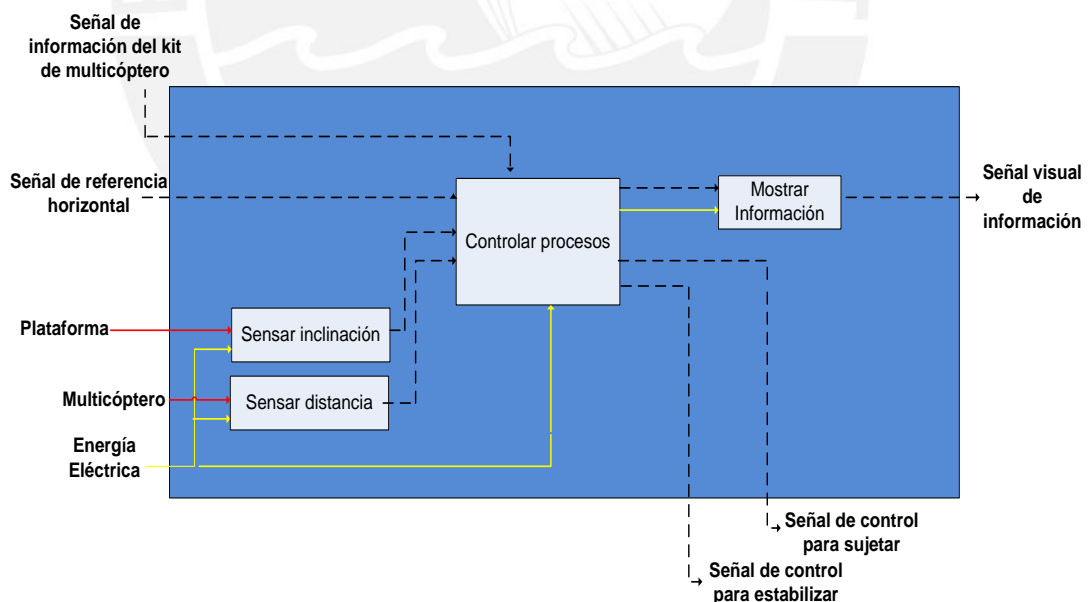


Figura 2.4 Estructura de funciones del Kit de multicoptero. Fuente: Elaboración propia

Para ver la estructura de funciones de manera general, ésta se encuentra en el Anexo A.2

2.3 Matriz morfológica

A partir de la estructura de funciones general se determinan los componentes convenientes para que se realicen las funciones descritas según los dominios abordados anteriormente. Por lo tanto, se presentan una tabla con los aspectos resaltantes de cada dominio. Para mayor detalle ver las matrices morfológicas que se encuentran en el anexo A3.

Tabla 2.1 Representación de dominios en las matrices morfológicas para la Plataforma.

Fuente: Elaboración propia

PORTADOR DE FUNCIONES	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
A. Dominio Mecánico			
Mover mecanismo de estabilización.	Motor a pasos	Actuador lineal eléctrico	Servomotor
Transmitir potencia para estabilizar.	Engranajes	Fajas con Poleas	-
Estabilizar.	Plataforma Stewart con 5 gdl	Robot paralelo de 2 gdl	Robot paralelo de 6 gdl
Mover mecanismo de sujeción.	Motor DC con encoder	Servomotor	Motor a pasos
Transmitir potencia para sujetar.	Engranajes	Fajas con Poleas	-
Sujetar.	Brazo robot sujetador de 3 gdl	Brazo robot sujetador de 4 gdl	Brazo robot sujetador de 5 gdl
Proteger ante vibraciones.	Aluminio	Plástico	Acero
Proteger ante la humedad.	Electric Shield	H2off Electric	Xanox Marine
B. Dominio Electrónico			
Energizar.	Batería	Panel solar	Grupo electrógeno
Regular Voltaje.	Acondicionador de Voltaje	Regulador conmutado	Regulador lineal
Comunicar.	Módulo Xbee	Módulo WIFI	Módulo Bluetooth
Capturar y transmitir imagen.	Cámara lineal con transmisor	Cámara VGA con transmisor	Webcam con transmisor
Procesar imagen.	Modulo Arduino	BeagleBone	Raspberry Pi 3
C. Dominio Control			
Controlar procesos.	Arduino	PIC	Tiva C
Sensar inclinación.	Sensor IMU	Acelerómetro	Giroscópio
Sensar distancia.	Sensar ultrasonido	Sensor infrarrojo	Sensor capacitivo
Mostrar información.	Aplicación para teléfono	Computador	Pantalla LCD

Tabla 2.2 Representación de la matriz morfológica del Kit de multicoptero.

Fuente: Elaboración Propia

PORTADOR DE FUNCIONES	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
Energizar.	Batería LiPo	Batería NiCd	Batería NiMh
Regular Voltaje.	Regulador Lineal	Regulador conmutado	Ninguno
Comunicar.	Módulo Xbee	Módulo WIFI	Módulo Bluetooth
Sensar distancia.	Sensor ultrasonido	Sensor infrarrojo	Sensor capacitivo
Sensar inclinación.	Sensor IMU	Acelerómetro	Giroscópio
Controlar Procesos.	Arduino Nano	PIC	FPGA

2.4 Evaluación técnica y económica de los conceptos de solución

Esta evaluación se realiza bajo la recomendación VDI 2225, donde se califican los conceptos bajo ciertos criterios, tanto técnicos como económicos (para más detalles ver Anexo A5).

2.4.1. Evaluación técnica

Los criterios para el análisis son los siguientes:

- Función Principal
- Requerimientos
- Rapidez de trabajo
- Forma
- Diseño
- Seguridad
- Ergonomía
- Complejidad de fabricación
- Facilidad de montaje
- Buen uso de la energía
- Estabilidad
- Transporte

Para calificar el cumplimiento de cada criterio, se tomarán niveles de 1 a 4 (siendo 4 el cumplimiento ideal, 3 un buen cumplimiento, 2 uno suficiente y 1 uno aceptable).

2.4.2. Evaluación económica

Los criterios para el análisis son los siguientes:

- Costo de material.
- Costo de la tecnología.
- Costo de fabricación.
- Fácil adquisición de materiales de fabricación.
- Cantidad de piezas.

Nuevamente para poder calificar el cumplimiento de cada criterio, se tomarán niveles de 1 a 4 (siendo 4 el cumplimiento ideal, 3 un buen cumplimiento, 2 uno suficiente y 1 uno aceptable) comparando los conceptos de solución que se detallan en el anexo A4.

2.5 Concepto de solución óptimo

En base a las evaluaciones realizadas que figuran en el Anexo A.5, donde se analiza los criterios técnicos y económicos de las posibles soluciones al problema, se aprecia que la mejor solución es el Concepto de Solución 1.

La razón es que tiene el mejor resultado según la escala de valores de los criterios mencionados anteriormente. Además, es evidente que es la solución que más se aproxima a una solución ideal.

En la Figura 2.5 se corrobora lo mismo por lo tanto se concluye que la solución 1 es la solución óptima para este tipo de problema que se plantea en este proyecto.

Esta solución es representada por un bosquejo en la Figura 2.6.

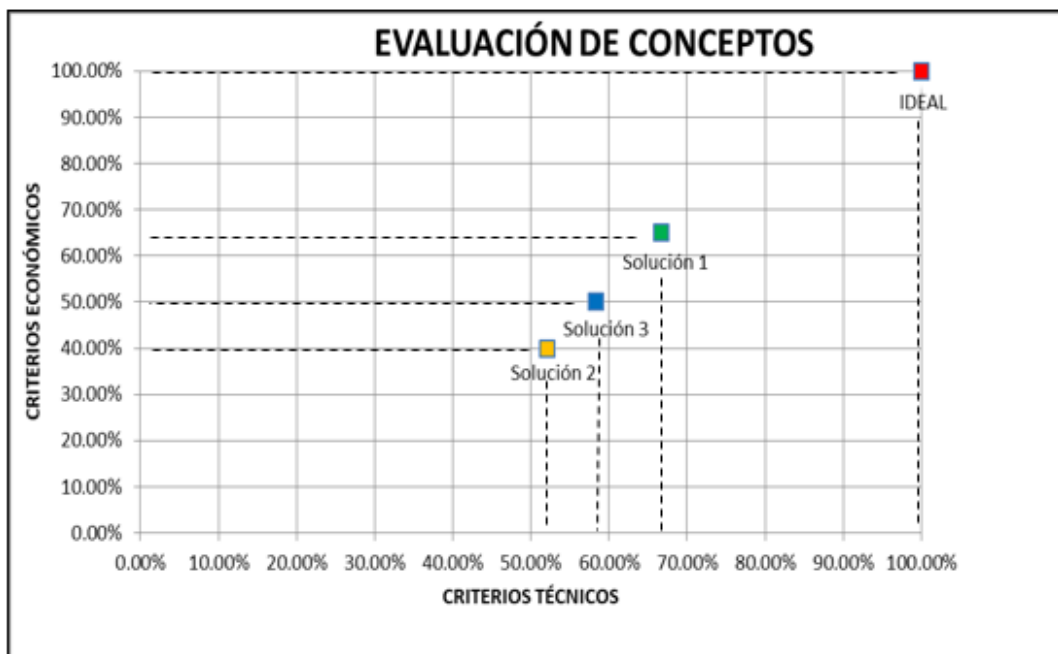


Figura 2.5 Gráfica de criterios económicos VS criterios técnicos. Fuente: Elaboración propia

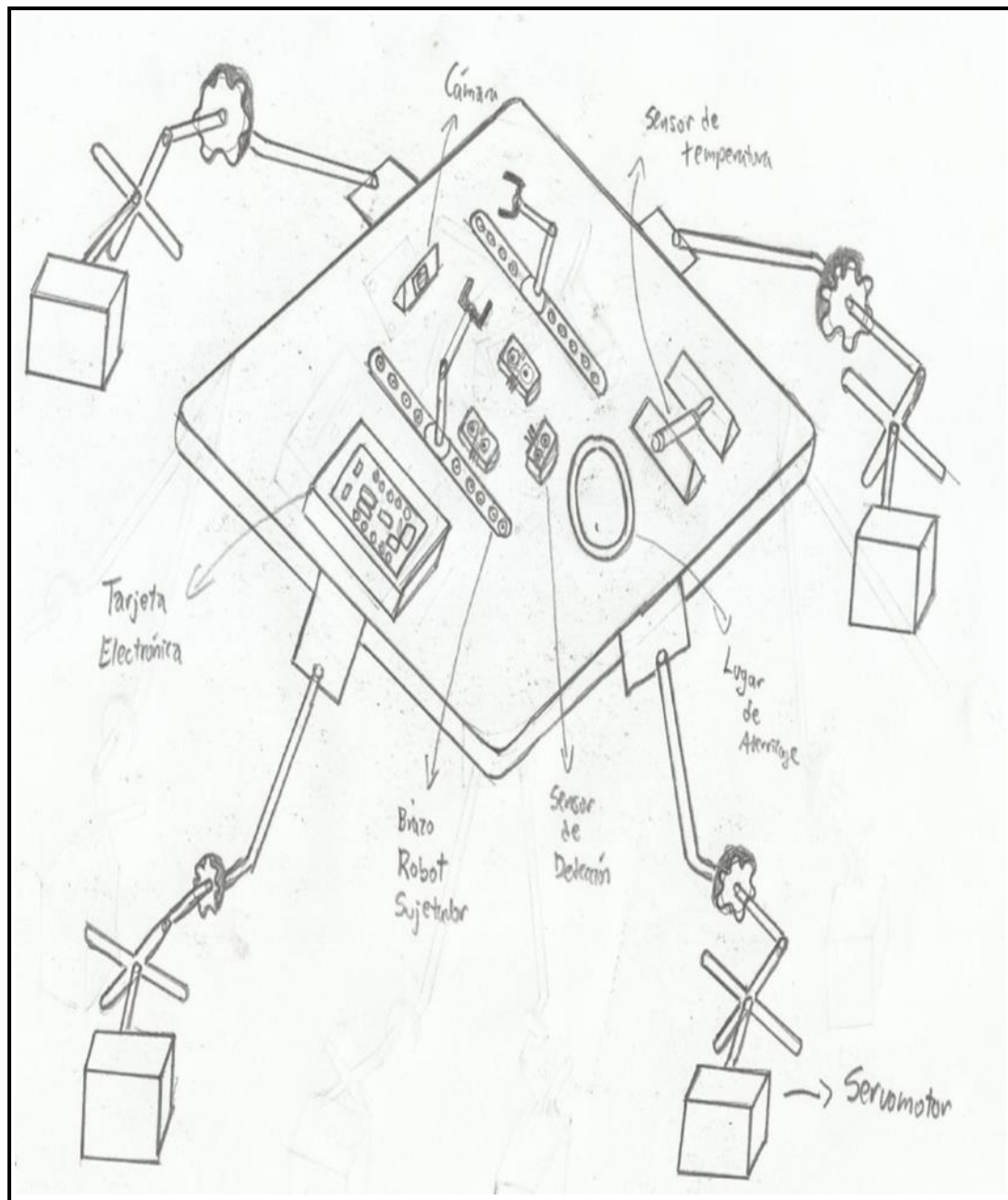


Figura 2.6 Concepto de Solución Óptimo. Fuente: Elaboración propia.

El concepto de solución óptimo consiste en cuanto a lo mecánico en dos subsistemas (estabilización y sujeción) siendo accionados por servomotores utilizando el modelo de la plataforma Stewart, en la parte superior cuenta con una placa y una tarjeta electrónico en donde se albergan ciertos componentes electrónicos y con sujetadores para poder atrapar al multicoptero cuando se aproxime a la plataforma. En lo concerniente a lo electrónico se emplean sensores de inclinación y proximidad, además de una cámara web para realizar el procesamiento de imágenes y evidentemente los microcontroladores adecuados para el control y procesamiento, En cuanto al control se aplica el algoritmo de control PID tanto para la sujeción como para la estabilización. Para mayores detalles ver el Anexo A4 (“Concepto de Solución 1”).

CAPITULO III: DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO

3.1 Diseño electrónico

En la presente sección se presenta el diagrama de bloques, los componentes electrónicos y los diagramas esquemáticos del sistema. Cabe señalar que los cálculos electrónicos se muestran en el Anexo A.6.

3.1.1 Diagrama de bloques

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques del sistema. Este diagrama presenta la interacción, a nivel general, entre los componentes electrónicos de la plataforma (sensores, actuadores, módulos de comunicación, controladores).

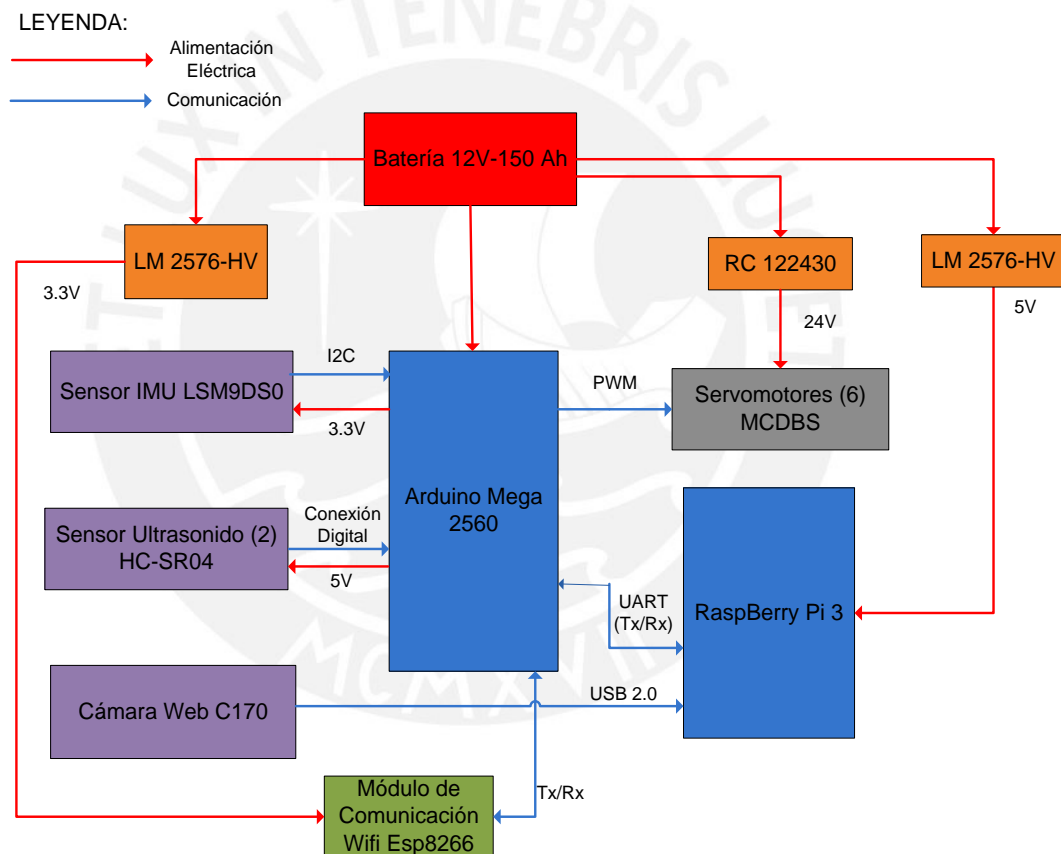


Figura 3.1 Diagrama de bloques de la plataforma. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.2 se muestra el diagrama de bloques del kit de multicoptero, mostrando la interacción entre los componentes electrónicos del kit del multicoptero (sensores, módulo de comunicación y un controlador).

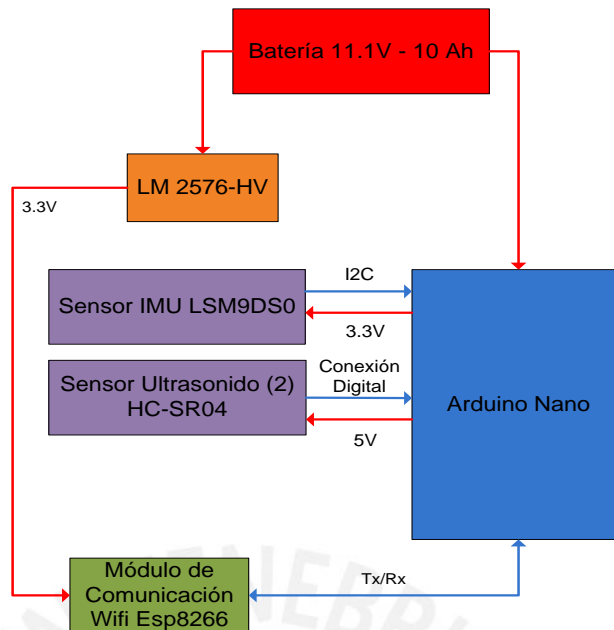


Figura 3.2 Diagrama de bloques del Kit del multicoptero. Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Componentes electrónicos

A continuación, se muestra los componentes que serán empleados en el sistema. Además, se muestra las alternativas para su elección de cada uno de ellos y el criterio de selección de los componentes.

Sensores

- ✓ Unidad de medición inercial (IMU)

Una unidad de medición inercial es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos. A partir de las características que tienen los sensores inerciales usados en el diseño de multicopteros comerciales, se establece en la Tabla 3.1 los requerimientos mínimos que debe tener este sensor en base a la precisión que debe tener este en sus componentes tales como el acelerómetro, giróscopo y magnetómetro que sugiere la fuente de dicha tabla. Luego en la tabla 3.2 se muestra la comparación entre los principales modelos de sensores IMU que se emplean en la actualidad.

Tabla 3.1 Requerimientos del sensor IMU.

Fuente: <http://electrotec.pe/blog>

Criterio	Valor
Rango de acelerómetro	±2g
Rango de giróscopo	± 180 grados por segundo
Rango de magnetómetro	±2g
Costo	USD 17-30

Tabla 3.2 Comparación entre sensores IMU. Fuente: <https://www.sparkfun.com>.

Nombre	Rango del acelerómetro (g)	Rango del giróscopo (dps)	Rango del magnetómetro (G)	Costo (USD)
Adafruit 9DOF-Fruit	$\pm 2, \pm 4$	± 250	± 1.3	28.36
LSM9DS0	$\pm 2, \pm 4, \pm 8$	± 230	± 2	17.47
Razor IMU	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$	± 2000	± 1	37.28

Las características de resolución son parecidas en los tres sensores, pero se requiere una resolución en el magnetómetro de 2G, por ello se escoge el sensor IMU **LSM9DS0** además de ser más económico. En la figura 3.3 se muestra a dicho sensor y sus características adicionales se muestran en la tabla 3.3.

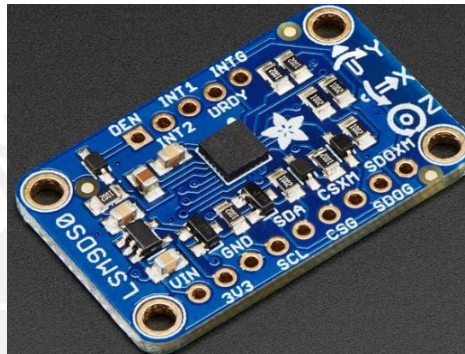


Figura 3.3 Sensor IMU LSM9DS0. Fuente: Fuente: <https://www.adafruit.com>

Tabla 3.3 Características adicionales del sensor LSM9DS0.

Fuente: <https://www.sparkfun.com>.

V_{in} (V)	Máx. consumo de Corriente (mA)	Resolución acelerómetro	Resolución giróscopo	Resolución magnetómetro
3 - 5	6.1	0.061 mg/digit	8.9 mdps/digit	1 mG/digit

✓ Distancia por ultrasonido

Los sensores de proximidad y distancia por ultrasonido se encargan de detectar objetos con rangos de distancia que van desde pocos centímetros hasta varios metros. Para ello emplean la emisión de un sonido que viaja y cuando llega a un objeto regresa dicho sonido al sensor. Con el tiempo que pasa desde que se emite hasta que regresa y con la velocidad del sonido, se calcula la distancia a la que está el objeto. Para escoger el sensor de ultrasonido se toma como criterio de requerimiento la distancia que está basada en la altura en la que se debería de encontrar el multicoptero respecto a la plataforma para poder sujetarlo con la medida del brazo del sujetador. En la figura 3.4 se muestra el requerimiento de manera gráfica, donde dicha altura es obtenida en base a los requerimientos de dimensiones de la lista de exigencias.

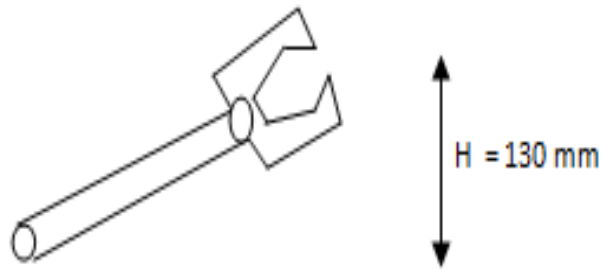


Figura 3.4 Requerimiento de distancia del sensor de ultrasonido. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.4 se establece los requerimientos que debe tener este sensor basado en lo explicado en el párrafo anterior. Luego en la tabla 3.5 se muestra la comparación entre sensores de ultrasonido.

Tabla 3.4 Requerimientos del sensor de ultrasonido. Fuente: Elaboración propia

Criterio	Valor
Rango de distancia de sensado	5 - 250 cm
Precisión	+/- 1 cm
Costo	S/. 15-60

Tabla 3.5 Comparación entre sensores de ultrasonido. Fuente: www.alcobot.com

Nombre	Rango de distancia (cm)	Pulso de disparo	Pulso de eco	Precisión	Costo (S/.)
SRF04	3 - 300	10 us	100 us - 18 ms	+/- 3 cm	16.00
SRF10	3 - 600	10 us	100 us - 10 ms	+/- 0.1 cm	55.00
HC-SR04	2 - 400	10 us	100 us - 60 ms	+/- 1 cm	20.00

De la tabla los tres sensores tienen características similares, además se tiene que utilizar una cantidad de dos sensores, por ello se selecciona el sensor de ultrasonido más económico el cual es el sensor **HC-SR04**. En la figura 3.5 se muestra la imagen del sensor de ultrasonido seleccionado y en la tabla 3.6 se muestra otras características relevantes de dicho sensor.

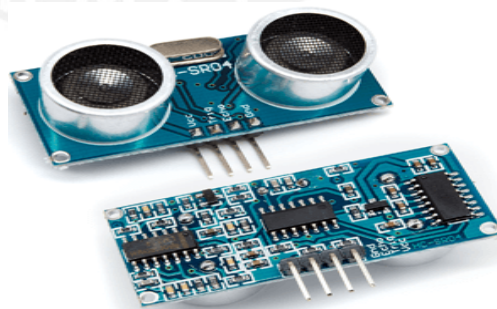


Figura 3.5 Sensor de ultrasonido HC-SR04. Fuente: www.micropik.com

Tabla 3.6 Características adicionales del sensor HC-SR04. Fuente: www.micropik.com

V in (V)	Corriente (mA)
5	15

✓ Cámaras web

Este tipo de cámaras se caracterizan por estar conectadas a computadoras o sistemas embebidos a través de un puerto USB. Su función es la de tomar capturas de imagen o grabar videos en formato digital. En la tabla 3.7 se manifiesta los requerimientos necesarios para que pueda realizar el procesamiento de imágenes, pues influye una resolución adecuada y la cantidad de pixeles para ubicar fácilmente el contorno de una figura de interés en la imagen tal como se indica en la fuente de dicha tabla.

Tabla 3.7 Requerimientos mínimos para la cámara.

Fuente: www.infordata.com.pe

Criterio	Valor
Resolución de Imagen	640x 480
Cantidad de pixeles en imagen	4Mpx
Costo	S/. 50-100

En la tabla 3.8 se muestra una comparación entre cámaras web presentando sus principales características.

Tabla 3.8 Comparación entre cámaras web. Fuente: www.infordata.com.pe

Nombre	Captura de fotografía	Resolución	Costo (S/.)
WebCam C170	5 Mpx	640 x 480	68.99
Pro Stream Webcam C992	8 Mpx	Full HD	157.45
Microsoft LifeCam 3000	2.1 Mpx	HD	160.30

De las tres opciones presentadas en la tabla se ajusta mejor a las necesidades la **Cámara web C170** pues no se requiere de mucha resolución según la tabla de requerimientos además es la más económica. En la figura 3.6 se muestra a dicha cámara web y en la tabla 3.9 se muestran otras características de esta cámara.



Figura 3.6 Cámara web C170. Fuente: www.logitech.com

Tabla 3.9 Características adicionales de la cámara web C170.

Fuente: www.logitech.com

Conexión	Dimensiones	N° Frames xsegundo
USB 2.0	21x7.6x15.2 cm	30

Actuadores

Los servomotores son motores de corriente continua en el que se puede controlar su ángulo de giro de su eje de manera electrónica por medio de un controlador.

De acuerdo a los cálculos realizados que se presentan más adelante en el subcapítulo 3.2.1 del diseño mecánico, se establece los requerimientos de torque y velocidad que debe tener el servomotor a seleccionar los cuales son mostrados en la tabla 3.10. Posteriormente en la tabla 3.11 se muestra una comparación entre los servomotores para la primera acción presentando sus principales características.

Tabla 3.10 Requerimientos del servomotor a seleccionar. Fuente: Elaboración propia

Criterio	Valor
Torque	5.22 Nm
Velocidad mínima sin carga	30 RPM
Costo	USD 200-400

Tabla 3.11 Comparación de servomotores. Fuente: www.directindustry.es

Nombre	Torque Máximo (N.m)	Corriente (A)	Modo de control	Costo (USD)
MCDBS	9	5	PWM	336.96
Futaba S9155	1.35	0.6	PWM	128.22
Hitec HSB-9465SH	1.32	0.6	PWM	125.79

Puesto que los servomotores mostrados tienen similares características se escoge el servomotor **MCDBS**, pues tiene un circuito de protección contra sobre-corriente y un rango de valores que contiene los torques mínimos necesarios (cuyos valores se muestran en el diseño mecánico) para realizar los dos principales movimientos mencionados anteriormente.

En la figura 3.7 se muestra la imagen del servomotor seleccionado y en la tabla 3.12 se muestra otras características del servomotor.



Figura 3.7 Servomotor MCDBS. Fuente: www.directindustry.es

Tabla 3.12 Características adicionales del servomotor MCDDBS.

Fuente: www.directindustry.es

Velocidad sin carga (rpm)	Voltaje (V)	Peso (g)
37.5	48	300

Controladores

Los controladores nos sirven para procesar datos de entrada, almacenar información y poder generar datos de salida en base a una lógica de control. En este caso los datos de entrada serán los sensores y los de salida serán evidentemente los actuadores.

En la tabla 3.13 se establece los requerimientos necesarios que debe tener el controlador de la plataforma basados en el cálculo del número de pines de conexión de los componentes electrónicos conectados a dicho controlador que se muestra en el Anexo A.6 y en el diagrama de bloques de la parte electrónica. Luego en la tabla 3.14 se muestra la comparación entre los microcontroladores del tipo Arduino.

Tabla 3.13 Requerimientos del controlador de la plataforma. Fuente: Elaboración propia

Criterio	Valor
Número mínimo de pines digitales	27
Número mínimo de pines analógicos	7
Número de pines PWM	7
Comunicación I2C y UART	Si
Costo	S/. 100-250

Tabla 3.14 Comparación entre los microcontroladores del tipo Arduino.

Fuente: <https://www.arduino.cc>

Modelo de Arduino	N° de pines digitales I/O	N° de pines PWM	Velocidad de Procesamiento (Mhz)	Memoria Flash	Memoria SRAM	Costo (S/.)
Arduino Nano	22	4	16	32 KB	2 KB	20.00
Arduino Mega 2560	54	15	16	256 KB	8 KB	187.00
Arduino Due	54	12	84	512 KB	96 KB	205.00

En el caso de la plataforma, se van a conectar cinco sensores como entradas y se necesitan al menos 6 salidas de onda PWM para poder controlar a los servomotores. Además, no se requiere de una gran velocidad de procesamiento ni de gran capacidad de memoria Sram. Por lo tanto, se escoge el modelo de Arduino llamado **Arduino Mega 2560**. En la figura 3.8 se muestra al microcontrolador seleccionado para la plataforma y en la tabla 3.15 se menciona características adicionales.

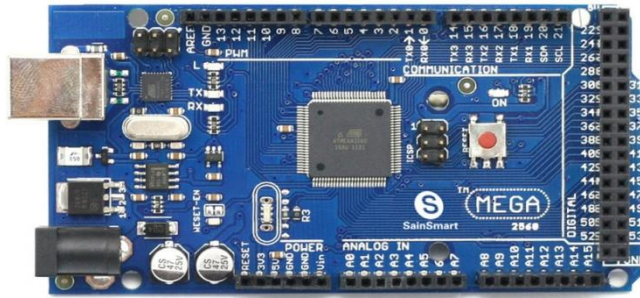


Figura 3.8 Microcontrolador Arduino Mega 2560. Fuente: www.arduino.cc

Tabla 3.15 Características complementarias del Arduino Uno. Fuente: www.arduino.cc

V in (V)	Corriente I/O (mA)	N° de bits
7 - 12	20	8

Para poder realizar la función del procesamiento de imagen se requiere de un microcontrolador de mayor capacidad y con más capacidad de almacenamiento, es decir de una mini computadora. Por ello en la tabla 3.16 se presentan los requerimientos que debe tener la minicomputadora en cuanto al procesamiento de imagen obtenidos por recomendación de la fuente de dicha tabla, después en la tabla 3.17 se compara las minicomputadoras que puedan utilizarse para tal función.

Tabla 3.16 Requerimientos de la minicomputadora para procesar imágenes.

Fuente: www.automatismos-mdq.com.ar

Criterio	Valor
Procesador de video	ARM Quadcore
Resolución	HD
Velocidad	1 Ghz
Costo	S/. 170-300

Tabla 3.17 Comparación entre mini computadoras.

Fuente: www.automatismos-mdq.com.ar

Sistema Embebido	Resolución	Velocidad	Procesador	Costo (S/.)
Raspberry Pi 3	Full HD	1.2 Ghz	ARM Quadcore	215.00
BeagleBone	HD	1 Ghz	ARM-Cortex A8	186.00
PandaBoard	Full HD	1.2 Ghz	ARM Dual core	260.00

De la tabla comparativa se escoge el sistema de mayor capacidad y mejor resolución, además de tener un precio razonable, el cual es el **Raspberry Pi 3**. En la figura 3.9 se muestra una imagen de dicho sistema embebido y en la tabla 3.18 se muestra otras características adicionales.



Figura 3.9 RaspBerry Pi 3. Fuente: <https://www.raspberrypi.org>

Tabla 3.18 Características adicionales del RaspBerry Pi 3.

Fuente: <https://www.raspberrypi.org>

V in (V)	Corriente I/O (mA)	Nº puertos USB
2-6	17 mA	4

Por otro lado, en el kit del multicoptero se necesita un modelo de menor capacidad. En la tabla 3.19 se muestran los requerimientos del controlador para dicho kit basados en el cálculo del número de pines de componentes conectados a este microcontrolador que se puede ver en el Anexo A6.

Tabla 3.19 Requerimientos del controlador del Kit de multicoptero. Fuente: Propia

Criterio	Valor
Número mínimo de pines digitales	10
Número mínimo de pines analogicos	5
Comunicación I2C y UART	Si
Costo	S/. 15-40

Luego de acuerdo a los requerimientos mencionados y a los controladores de la tabla 3.19 vistos anteriormente además de su bajo peso (7 gramos) se escoge el modelo de Arduino llamado **Arduino Nano**. En la figura 3.10 se muestra al microcontrolador seleccionado para el kit del multicoptero y en la tabla 3.20 se menciona características complementarias.

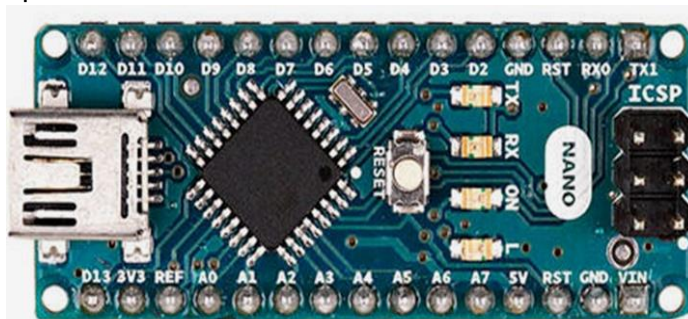


Figura 3.10 Microcontrolador Arduino Nano. Fuente: www.arduino.cc

Tabla 3.20 Características complementarias del Arduino Nano. Fuente: www.arduino.cc

V in (V)	Corriente I/O (mA)	Nº de bits
7 - 12	20	8

Módulo de comunicación WIFI

El módulo de comunicación WIFI permite enviar y recibir datos a través de una red de internet de manera inalámbrica. Además, es la forma de comunicación que emplean la mayoría de multicopteros. En la tabla 3.21 se muestran los requerimientos mínimos que debe tener el módulo de comunicación WIFI para realizar su labor de forma satisfactoria en base a pruebas hechas en ambientes marítimos. Luego en la tabla 3.22 se da una comparación entre los módulos de comunicación WIFI.

Tabla 3.21 Requerimientos del módulo de comunicación WIFI. Fuente: www.sparkfun.com

Criterio	Valor
Rango de alcance	0 - 3
Tasa de transmisión de datos	6 Mbps
Costo	S/. 15-50

Tabla 3.22 Comparación entre módulos de comunicación WIFI. Fuente: www.sparkfun.com

Nombre	Tasa de transmisión de datos	Rango máximo (m)	Costo (S/.)
ESP8266	11 Mbps	0 - 5	35.00
NRF24L01	2 Mbps	0 - 2	18.00

A partir de la tabla se escoge el módulo de comunicación **ESP8266** pues tiene mejor tasa de transmisión y un mayor rango de alcance. En la figura 3.11 se muestra una imagen de este módulo de comunicación y en la tabla 3.23 se muestran otras características adicionales de este módulo.

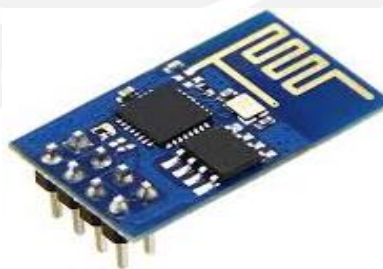


Figura 3.11 Módulo de comunicación Wifi Esp8266. Fuente: www.sparkfun.com

Tabla 3.23 Características adicionales del módulo Esp8266.

Fuente: www.sparkfun.com

V in (V)	Corriente (mA)
3 - 3.6	80

Baterías

La batería es la fuente de energía eléctrica que nos otorgará la autonomía requerida según lista de exigencias. En este caso se usará dos baterías, una para la plataforma y otra para el kit del multicoptero. En la tabla 3.24 se muestra los requerimientos que deben contar los baterías basados en los cálculos de corriente y la autonomía (ver Anexo A6).

Tabla 3.24 Requerimientos de las baterías. Fuente Elaboración propia

Batería	Voltaje (V)	Capacidad (Ah)
Plataforma	12	150
Kit de Multicoptero	12	2

En base a los requerimientos anteriores se selecciona las baterías. En la figura 3.12 se muestra la batería **FL121500** que será empleada para la plataforma, la cual es recargable y cumple con los requerimientos y en la tabla 3.25 se muestra las características de dicha batería, cabe señalar que fue la única opción encontrada.

Esta batería se recarga con una fuente de poder de 12V y 30 A.



Figura 3.12 Batería FL121500. Fuente: www.energitronic.net

Tabla 3.25 Características resaltantes de la batería FL121500.

Fuente: www.energitronic.net

Capacidad (Ah)	Descarga (C)	Masa (kg)	Costo (USD)
150	10	5	306.47

Posteriormente, en la figura 3.13 se muestra la batería **LiPo DBT** que será empleada para el kit del multicoptero, cumpliendo evidentemente con los requerimientos mencionados anteriormente en la tabla 3.24 y en la tabla 3.26 se muestra las características de esta batería. Cabe resaltar que esta batería fue la única opción que se llegó a encontrar. La batería LiPo requiere para poder cargarse de una fuente de poder de 12 V y un módulo cargador que viene con un cable de conexión a la fuente de poder y al conector de la batería LiPo como se muestra en la figura 3.14. y se describen sus especificaciones importantes en las tablas 3.27 y 3.28.



Figura 3.13 Batería LiPo DBT. Fuente: www.aliexpress.com/

Tabla 3.26 Características resaltantes de la batería LiPo DBT.

Fuente: www.aliexpress.com/

Capacidad (Ah)	Descarga (C)	Masa (kg)	Costo (USD)
10	25	0.1	72.99



Figura 3.14 a) Módulo cargador de Batería LiPo DBT Figura 3.14 b) Fuente de Poder de 12V y 600 W.

Fuente: www.aliexpress.com/

Tabla 3.27 Características resaltantes del Módulo cargador de Batería LiPo DBT

Fuente: www.electronicaembajadores.com

Rango de V_{in} (V)	Carga máxima (W)	Descarga máxima (W)	Rango de Corriente de carga (A)
11 - 18 DC	80	10	0.1 - 10

Tabla 3.28 Características resaltantes de la Fuente de Poder de 12V y 600 W.

Fuente: www.electronicaembajadores.com

Rango de V_{in} (V)	Rango de V_{out} (V)	Rizado (mV)	Potencia (W)
180 - 264 AC	10 - 13.5 DC	150	600

Convertidor DC-DC elevador

Este circuito integrado permite elevar un voltaje de entrada a uno superior de salida en base a conmutaciones con un microcontrolador y transistores. Se requiere emplear este integrado porque se requiere de un mayor voltaje de alimentación en los actuadores. A continuación, se muestra en la tabla 3.29 los requerimientos necesarios que debe tener este convertidor en base a los voltajes de alimentación que se necesita.

Tabla 3.29 Requerimientos del convertidor DC-DC elevador. Fuente: Elaboración propia

Criterio	Valor
Tensión de entrada	12 V
Tension de salida	24 V
Corriente de salida	240 A
Costo	USD 10-40

En la figura 3.15 se muestra el convertidor elegido el cual es **RC122430** y en la tabla 3.30 se muestran sus características correspondientes.



Figura 3.15 Convertidor elevador RC122430. Fuente: www.aliexpress.com

Tabla 3.30 Características del convertidor elevador RC122430.

Fuente: www.aliexpress.com

Rango de Vin (V)	Regulación de Voltaje (%)	Regulación de carga (%)	Eficiencia	Costo (USD)
9 - 16	< 1	< 2	96%	30.03

3.1.3 Diagrama esquemático

En esta sección se presenta el diagrama esquemático en general y las partes más relevantes de dicho diagrama mostrando conexiones de alimentación, de regulación y de conversión tipo elevador. Para el diseño electrónico se empleó la siguiente fuente: [15].

Reguladores de voltaje

En la figura 3.16 se muestra la conexión de la batería y los reguladores conmutados conectados a la batería que se emplearan en la plataforma automática para alimentar al procesador de video (RaspBerryPi3) y el módulo de comunicación Wifi.

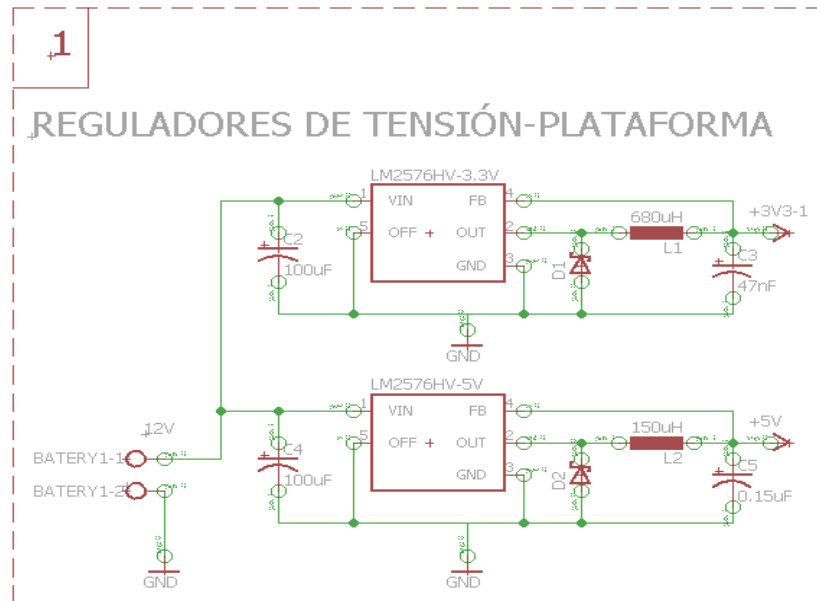


Figura 3.16 Reguladores de tensión de 5V y 3.3V. Fuente: Elaboración propia

Convertidor DC-DC elevador (Boost)

Puesto que los servomotores requieren de un voltaje mayor al que ofrece la batería se emplea un convertidor tipo elevador (boost) para que se alcance el voltaje de alimentación adecuado. Además, cuenta internamente con un regulador para mantener dicho voltaje deseado. En la figura 3.17 se muestra dicha conexión.

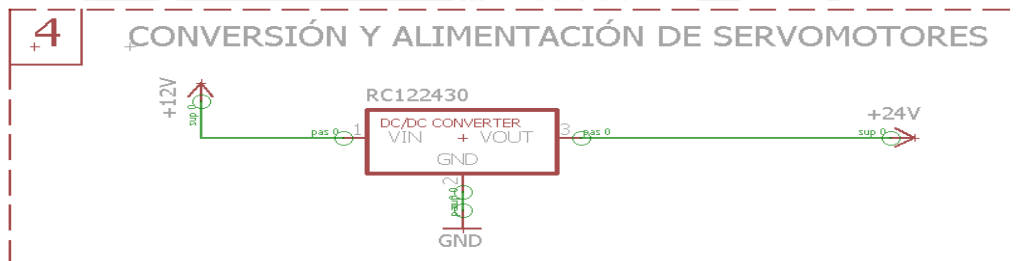


Figura 3.17 Conversión de voltaje DC-DC elevador. Fuente: Elaboración propia

Conexión Arduino Mega 2560 – sensores-RaspBerryPi3

En la figura 3.18 se muestra la conexión que hay entre los sensores de la plataforma con su controlador y también la conexión entre la cámara web y el procesador de imagen. Además de la comunicación entre el Arduino y el procesador de imagen.

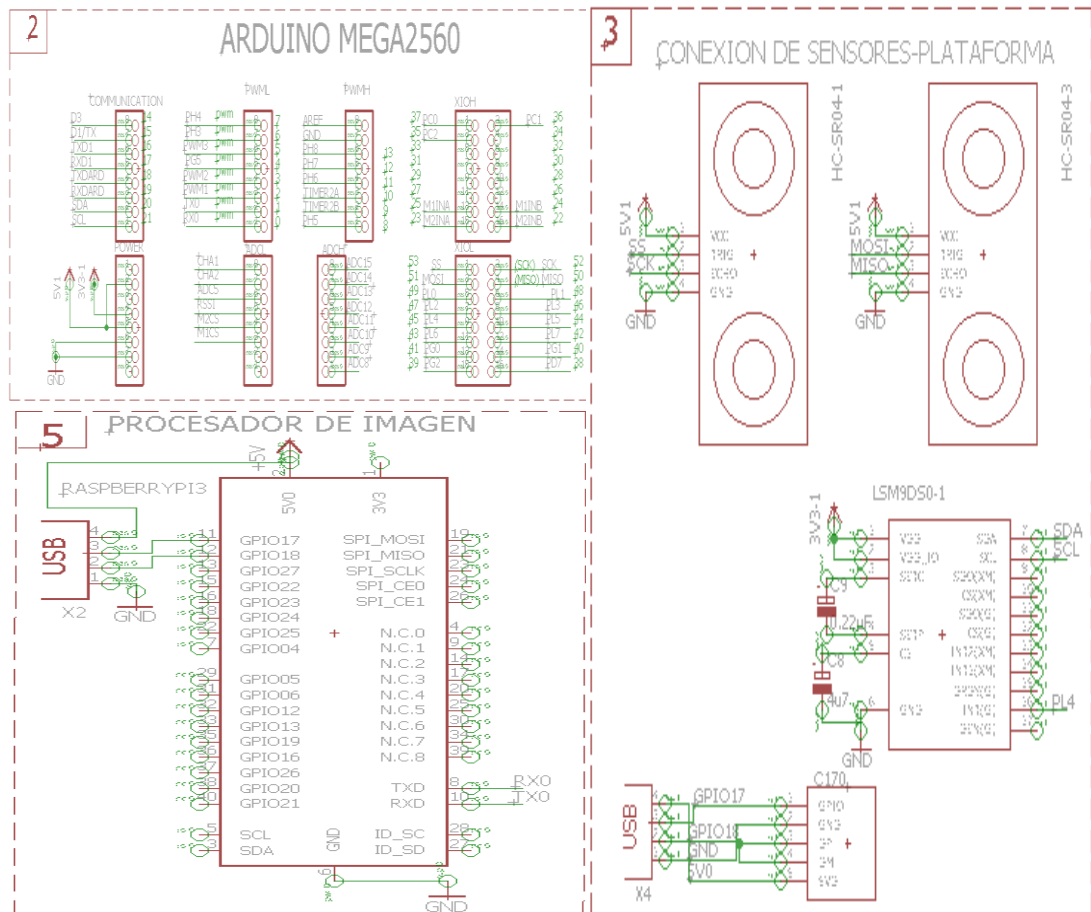


Figura 3.18 Conexión entre los sensores de plataforma, el controlador y el procesador de imagen. Fuente: Elaboración propia

Módulo de comunicación Wifi

En la figura 3.19 se muestra las conexiones del módulo de comunicación Wifi que se comunicara con el controlador y enviara la información a la estación remota. Además, se comunicará con el controlador del kit de multicóptero para obtener los datos de los sensores conectados a dicho kit.

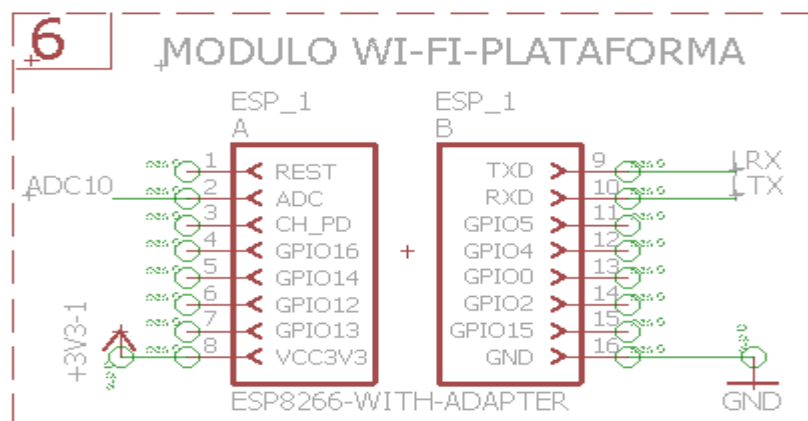


Figura 3.19 Conexiones del módulo de comunicación Wifi. Fuente: Elaboración propia

Conexión Arduino Nano - sensores del Kit

En la figura 3.20 se muestra la conexión entre los sensores del kit de multicoptero con el controlador de dicho kit.

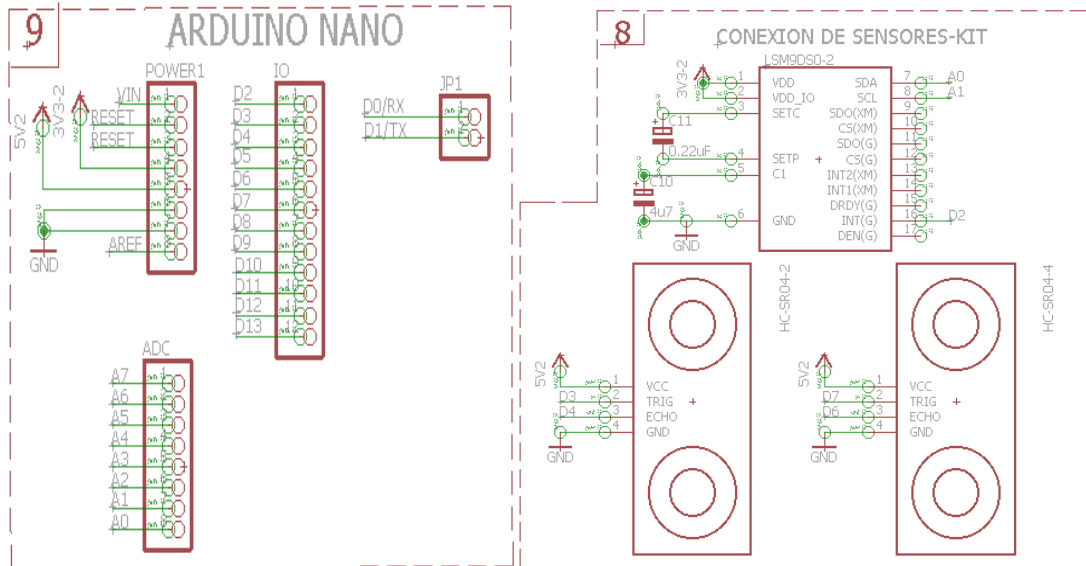


Figura 3.20 Conexión entre sensores con el controlador dentro del Kit de multicoptero.

Fuente: Elaboración propia

3.2 Diseño mecánico

En esta sección se presentan y describen los planos principales del sistema. En primer lugar, se presenta los cálculos mecánicos más resaltantes y posteriormente los planos de ensamble y finalmente los planos de despiece. Además, los demás cálculos mecánicos y de diseño están en el Anexo A.5. Los presentes cálculos de diseño mecánico se realizaron a partir de las siguientes fuentes: [16], [17] y [18].

3.2.1 Cálculos mecánicos

Cálculo del torque del servomotor para la sujeción:

En la figura 3.21 se muestra el siguiente modelo cinemático de los eslabones de sujeción (gripper).

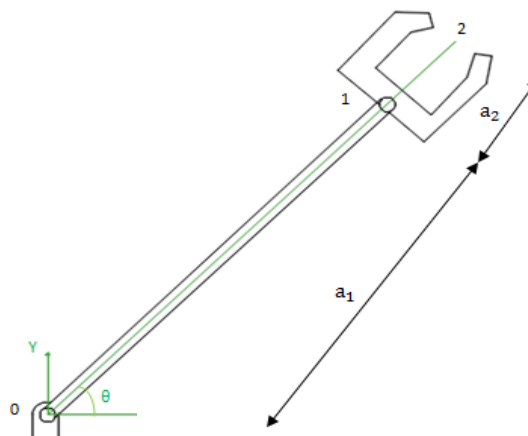


Figura 3.21 Modelo cinemático del gripper. Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones de movimiento de los eslabones son las siguientes:

➤ Posición

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos\theta \\ a_1 \sin\theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_1 + a_2) \cos\theta \\ (a_1 + a_2) \sin\theta \end{bmatrix}$$

➤ Velocidad

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 \sin\theta \cdot \dot{\theta} \\ a_1 \cos\theta \cdot \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(a_1 + a_2) \sin\theta \cdot \dot{\theta} \\ (a_1 + a_2) \cos\theta \cdot \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

➤ Aceleración

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{y}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 \sin\theta \cdot \ddot{\theta} - a_1 \cos\theta \cdot \dot{\theta}^2 \\ a_1 \cos\theta \cdot \ddot{\theta} - a_1 \sin\theta \cdot \dot{\theta}^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(a_1 + a_2)(\sin\theta \cdot \ddot{\theta} + \cos\theta \cdot \dot{\theta}^2) \\ (a_1 + a_2)(\cos\theta \cdot \ddot{\theta} - \sin\theta \cdot \dot{\theta}^2) \end{bmatrix}$$

Luego por medio del modelo dinámico de los eslabones de sujeción y las ecuaciones de Euler-Lagrange, se hallarán los torques necesarios.

Se determina la energía cinética de cada eslabón:

$$K_1 = \frac{1}{2} (I_1 \dot{\theta}^2 + m_1 (a_1 \cdot \dot{\theta})^2)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} ((I_2) \dot{\theta}^2 + m_2 (a_2 \cdot \dot{\theta})^2)$$

Se halla la energía potencial de cada eslabón:

$$U_1 = m_1 g a_1 \sin\theta$$

$$U_2 = m_2 g a_2 \sin\theta$$

Se determina el lagrangiano de los dos eslabones en conjunto y el lagrangiano del eslabón 2:

$$L_{1-2} = K_1 + K_2 - (U_1 + U_2)$$

$$L_2 = K_2 - U_2$$

Finalmente, los torques que se necesita resultan:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{1-2}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L_{1-2}}{\partial \theta} = \tau_{1-2} \dots (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_2}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L_2}{\partial \theta} = \tau_2 \dots (2)$$

En la tabla 3.31 se muestran las masas, longitudes e inercias para el cálculo de torques del presente mecanismo.

Tabla 3.31 Medidas de longitud, masa e inercia de los eslabones de sujeción.

Fuente: Elaboración propia

Elemento	Longitud (mm)	Masa(kg)	Inercia respecto al eje X(kg.mm ²)	Inercia respecto al eje y(kg.mm ²)	Inercia respecto al eje z(kg.mm ²)
Eslabón 1	150	0.02	0.381	36.776	36.776
Eslabón 2	54.5	2	0.03	0.74	0.753

Se considera una velocidad de 10 rpm en el arranque del sujetador en un tiempo de 0.5 segundos, por lo tanto se tiene que $\ddot{\theta} = 2.09 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$.

En la tabla 3.32 se muestra la aceleración angular que habrá en los eslabones.

Tabla 3.32 Datos para el cálculo de torque del conjunto de eslabones 1 y 2.

Fuente: Elaboración propia

Elemento	Aceleración angular (rad/s ²)	Velocidad angular(rad/s)	Posición angular(rad)
Eslabón 1	2.09	0	0
Eslabón 2	2.09	0	0

Reemplazando los datos de las tablas 3.31 y 3.32 en la ecuación (1) se obtiene

$$\tau_{1-2} = 2.76 \text{ Nm}$$

Tabla 3.33 Datos para el cálculo de torque del eslabón 2. Fuente: Elaboración propia

Elemento	Aceleración angular (rad/s ²)	Velocidad angular(rad/s)	Posición angular(rad)
Eslabón 1	0	0	0
Eslabón 2	2.09	0	0

Reemplazando los datos de las tablas 3.31 y 3.33 en la ecuación (2) resulta

$$\tau_2 = 2.11 \text{ Nm}$$

Cálculo del torque del servomotor para la estabilización:

En la figura 3.22 se muestra el siguiente modelo cinemático de los eslabones de estabilización.

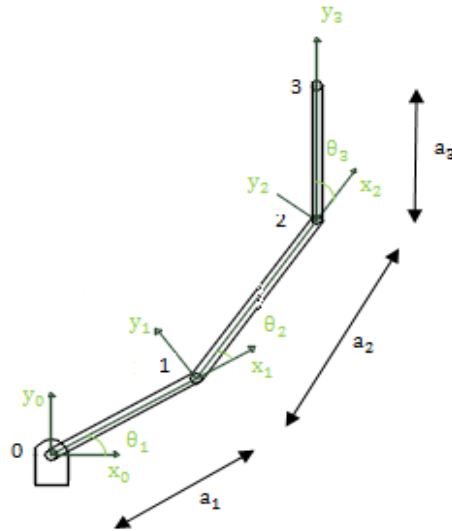


Figura 3.22 Modelo cinemático de los eslabones de estabilización. Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones de movimiento son:

➤ Posición

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos \theta_1 \\ a_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \end{bmatrix}$$

➤ Velocidad

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 \\ a_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ a_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ a_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \end{bmatrix}$$

➤ Aceleración

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{y}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 - a_1 \sin \theta_1 \cdot \ddot{\theta}_1 \\ -a_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 + a_1 \cos \theta_1 \cdot \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 - a_1 \sin \theta_1 \cdot \ddot{\theta}_1 - a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \\ -a_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 + a_1 \cos \theta_1 \cdot \ddot{\theta}_1 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_3 \\ \ddot{y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 - a_1 \sin \theta_1 \cdot \ddot{\theta}_1 - a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \\ -a_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 + a_1 \cos \theta_1 \cdot \ddot{\theta}_1 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \end{bmatrix}$$

Luego por medio del modelo dinámico de los eslabones de estabilización y las ecuaciones de Euler-Lagrange, se hallará el torque necesario para mover a todo el conjunto de eslabones.

Se determina la energía cinética de cada eslabón:

$$K_1 = \frac{1}{2} (I_1 \dot{\theta}_1^2 + m_1 (a_1 \cdot \dot{\theta}_1)^2)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} (I_2 \dot{\theta}_2^2 + m_2 (a_2 \cdot \dot{\theta}_2)^2)$$

$$K_3 = \frac{1}{2} (I_3 \dot{\theta}_2^2 + m_3 (a_3 \cdot \dot{\theta}_2)^2)$$

Se halla la energía potencial de cada eslabón:

$$U_1 = m_1 g \frac{a_1}{2} \text{sen}\theta_1$$

$$U_2 = m_2 g (a_1 \text{sen}\theta_1 + \frac{a_2}{2} \text{sen}(\theta_1 + \theta_2))$$

$$U_3 = m_3 g (a_1 \text{sen}\theta_1 + a_2 \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) + \frac{a_3}{2})$$

Se determina el lagrangiano del conjunto de eslabones.

$$L_{1-2} = K_1 + K_2 + K_3 - (U_1 + U_2 + U_3)$$

Finalmente, el torque resulta:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{1,2,3}}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L_{1,2,3}}{\partial \theta_1} = \tau_{1,2,3} \dots (3)$$

En la tabla 3.34 se muestran las masas, longitudes e inercias para el cálculo del torque del presente mecanismo.

Tabla 3.34 Medidas de longitud, masa e inercia de los eslabones de estabilización.

Fuente: Elaboración propia

Elemento	Longitud (mm)	Masa(kg)	Inercia respecto al eje X(kg.mm ²)	Inercia respecto al eje y(kg.mm ²)	Inercia respecto al eje z(kg.mm ²)
Eslabón 1	100	0.32	0.018	3.973	3.97
Eslabón 2	150	0.5	37.453	0.018	33.945
Eslabón 3	145	0.48	36.929	0.017	31.277

Se considera una velocidad de 5 rpm en el arranque del sujetador en un tiempo de 0.5 segundos, por lo tanto se tiene que $\ddot{\theta} = 1.045 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$.

En la tabla 3.35 se muestra la aceleración angular que habrá en los eslabones analizándolo a uno por uno.

Tabla 3.35 Datos para el cálculo de torque del conjunto de eslabones 1,2 y 3.

Fuente: Elaboración propia

Elemento	Aceleración angular (rad/s ²)	Velocidad angular(rad/s)	Posición angular(rad)
Eslabón 1	1.045	0	0
Eslabón 2	1.045	0	0
Eslabón 3	1.045	0	0

Reemplazando los datos de las tablas 3.34 y 3.35 en la ecuación (3) se obtiene

$$\tau_{1,2,3} = 5.35 \text{ Nm}$$

Cálculo de resistencia al pandeo de eslabones

En la figura 3.23 se muestra el diagrama de cuerpo libre de la plataforma móvil junto con las reacciones producidas por los pares de eslabones.

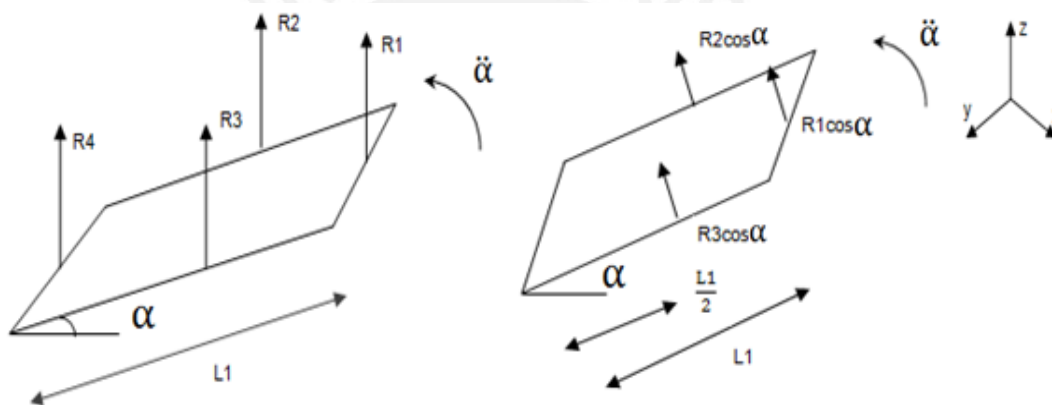


Figura 3.23 DCL de la plataforma con las reacciones de cada par de eslabones.

Fuente: Elaboración propia

Analizando cada par de eslabones, cuando se sitúa la plataforma en posición horizontal, el peso de la plataforma estará distribuido homogéneamente en cada par de eslabones. Sin embargo, al levantarse el par R1 de estos eslabones y también sus otros dos pares laterales (R2 y R3) y que quede sin moverse su par frontal (R4) Entonces se cumple lo siguiente:

Por la 2da ley de Newton (Rotacional):

$$\sum M_x = 0$$

$$R_2 = R_3 \dots (1)$$

$$\sum M_y = I_y \times \ddot{\alpha}$$

$$R_1 \cos \alpha L_1 + R_2 \cos \alpha \frac{L_1}{2} + R_3 \cos \alpha \frac{L_1}{2} = I_y \times \ddot{\alpha} \dots (2)$$

Reemplazando (1) en (2) se obtiene:

$$(R_1 + R_2) \cos \alpha L_1 = I_y \times \ddot{\alpha} \dots (3)$$

Analizando el DCL de la figura 3.24

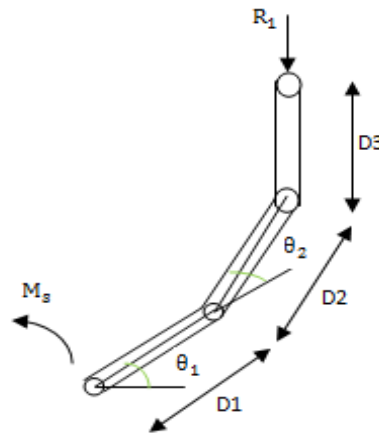


Figura 3.24 DCL de un par de eslabones. Fuente: Elaboración propia

Por 2da ley de Newton Rotacional:

$$\sum M_y = I_y \times \ddot{\theta}$$

$$M_s - R_1(D1 \cos \theta_1 + D2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) = I_{\text{esl-est}} \ddot{\theta} \dots (4),$$

$$R_1 = M_s - \frac{I_{\text{esl-est}} \ddot{\theta}}{(D1 \cos \theta_1 + D2 \cos(\theta_1 + \theta_2))} \dots (5),$$

Reemplazando la ecuación (5) con los siguientes datos:

$$M_s = 5.35 \text{ Nm}, I_{\text{esl-est}} = 76.929 \text{ Kgmm}^2, \theta_1 = 20^\circ, \theta_2 = 23^\circ, D1 = 0.1 \text{ m}, D2 = 0.15 \text{ m}, D3 = 0.145 \text{ m}, \ddot{\theta} = 1.045 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$R_1 = 1300 \text{ N} \dots (6),$$

Los datos son:

$$L_1 = 0.7 \text{ m}, I_y = 3083.51 \text{ kg. mm}^2, \ddot{\alpha} = 1.045 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Reemplazando estos datos en la ecuación (3):

$$(R_1 + R_2) \cos \alpha = 1317.25 \text{ N},$$

Tomando como posición crítica una inclinación de 33°

$$R_1 + R_2 = 1570.65 \text{ N} \dots (7),$$

Reemplazando la ecuación (6) en (7):

$$R_2 = 270.65 \text{ N} \dots (8),$$

Al alcanzar la posición crítica se cumple el equilibrio:

$$\sum F_z = 0$$

$$R_1 + R_2 + R_3 = R_4 \dots (9),$$

Reemplazando las ecuaciones (1), (7) y (8) en (9) se obtiene la carga que sufrirá el eslabón en pandeo.

$$R_4 = 1841.3\text{N}$$

Luego analizamos el pandeo en un par de eslabones:

En la figura 3.25 se muestra el DCL de las fuerzas que actúan sobre el par de eslabones.

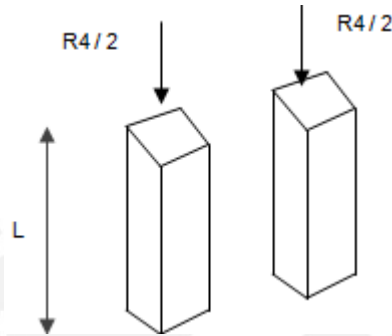


Figura 3.25 DCL de eslabones sometidos a pandeo. Fuente: Elaboración propia

Los datos son los siguientes:

$$L_p = L = 300 \text{ mm}, I_x = 1197 \text{ mm}^4, A = 36 \text{ mm}^2$$

Luego:

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

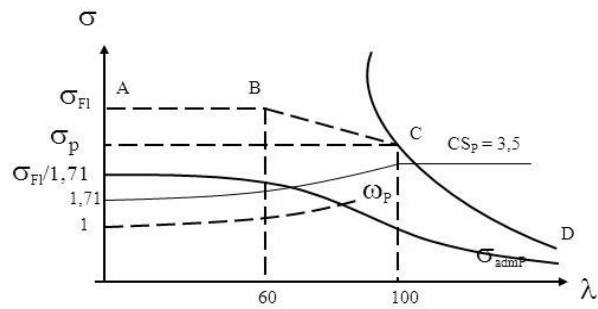
$$\lambda = \frac{L_p}{i_x}$$

Reemplazando:

$$\lambda = \frac{300}{5.76} = 52.08$$

Según el método europeo o Tetmajer modificado se cumple la siguiente función del esfuerzo de pandeo respecto a la esbeltez.

$$\sigma_{\text{Adm Pandeo}} = \left. \begin{cases} \frac{\sigma_F}{FS'} & \text{si } \lambda \leq 60 \\ \frac{a_1 - a_2 \lambda}{FS} & \text{si } 60 \leq \lambda \leq 100 \\ \frac{\pi^2 E}{FS \cdot \lambda^2} & \text{si } \lambda \geq 100 \end{cases} \right\}$$



Como $\lambda \leq 60$:

$$\sigma_{\text{Adm Pandeo}} = \frac{\sigma_F}{FS} = \frac{489.6}{9} = 54.4 \text{ MPa}$$

$$R_4 \leq \sigma_{\text{Adm Pandeo}} \times A = 54.4 \times 36$$

$$1841.3 \text{ N} \leq 1958.4 \text{ N} \text{ Cumple!}$$

3.2.2 Proceso del ensamble general

El ensamble general de este sistema consiste principalmente en juntar los subensambles de sujeción y de estabilización por medio de pines e uniones atornilladas, además de algunos componentes electrónicos que están en una tarjeta electrónica contenida en una cubierta y otros soportes para componentes que deben estar a la intemperie para que puedan cumplir su función. Esto se detalla en el plano de ensamble general.

La vista isométrica de la plataforma automática se muestra en la figura 3.26. Las dimensiones de este sistema son de 1000 mm x 1000 mm x 500 mm. Además, se muestra los componentes principales tales como los mecanismos de sujeción y estabilización y los servomotores utilizados.

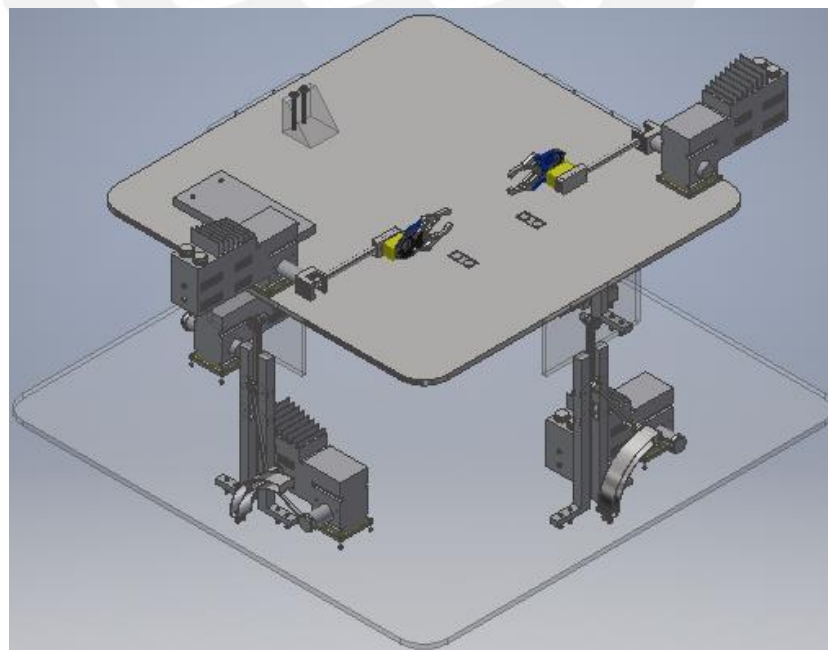


Figura 3.26 Vista isométrica de la plataforma automática. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.27 se muestra la vista horizontal del sistema donde se muestra la cubierta de la tarjeta electrónica junto con los soportes para los sensores y la cámara; además de mostrar a dos sensores de distancia. Posteriormente en la figura 3.28 se muestra una vista de perfil del sistema donde se aprecia mucho mejor los dos subensambles de sujeción y en la figura 3.29 se ve con mayor detalle al subensamble de estabilización junto con sus respectivos servomotores.

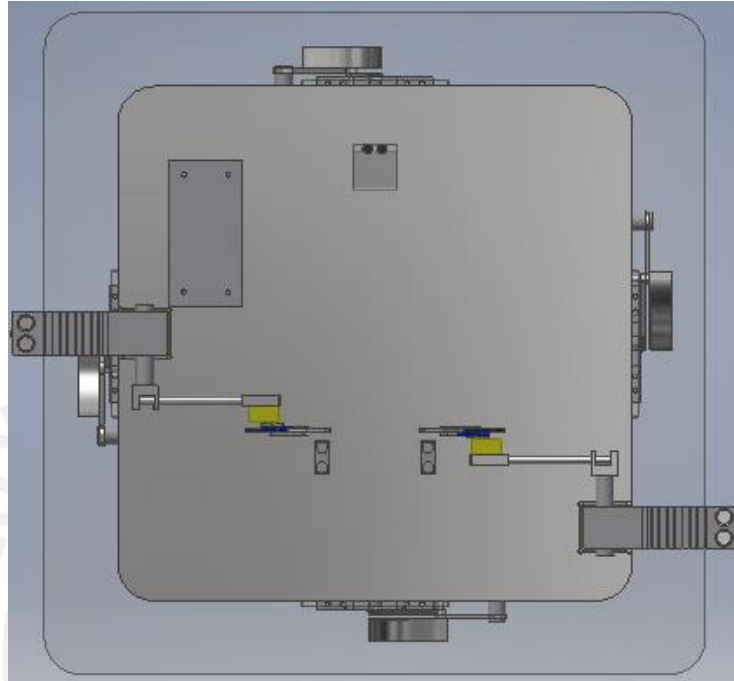


Figura 3.27 Vista horizontal de la plataforma automática. Fuente: Elaboración propia

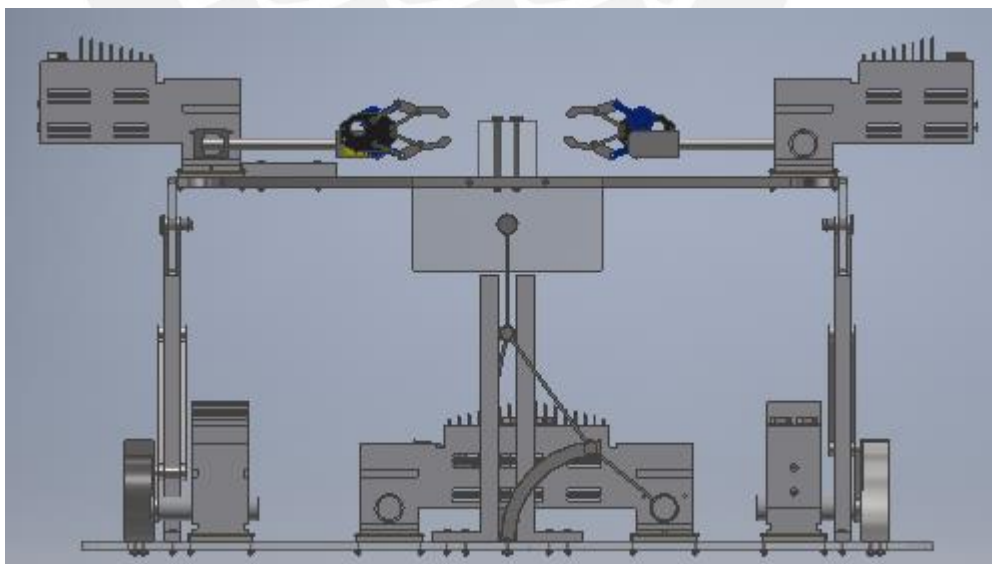


Figura 3.28 Vista de perfil de la plataforma automática. Fuente: Elaboración propia

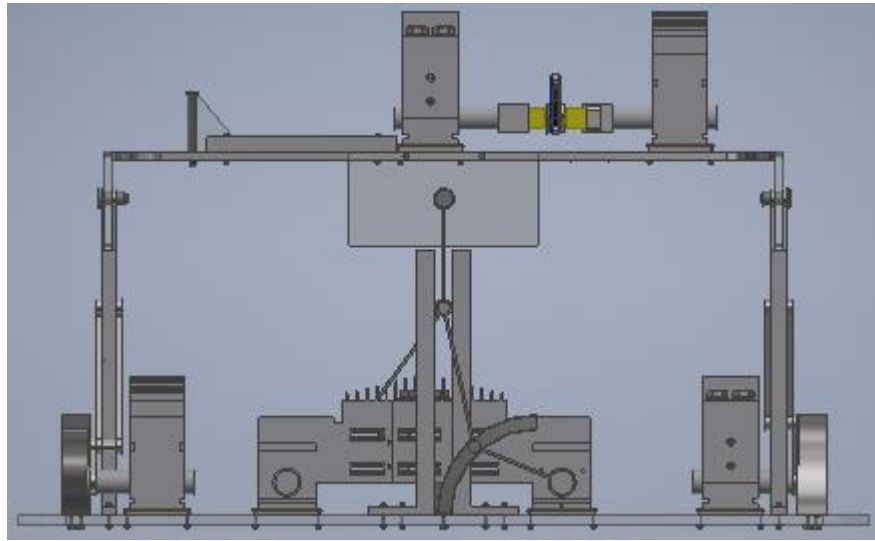


Figura 3.29 Vista frontal de la plataforma automática. Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Proceso de los subensambles del sistema

Subensamble de sujeción

El proceso del subensamble de sujeción se realiza mediante la unión atornillada de los sujetadores o grippers, el eslabón de sujeción, su servomotor y otros soportes de acoplamiento.

En la figura 3.30 se muestra el subensamble de sujeción conformado por un brazo robot sujetador de dos grados de libertad siendo accionados cada uno por un servomotor. Cada brazo robot tiene eslabones y engranajes adecuados y posicionados de tal forma que aseguren la sujeción en cada patilla del multicoptero (pues por lo general los multicopteros cuentan con dos patillas).

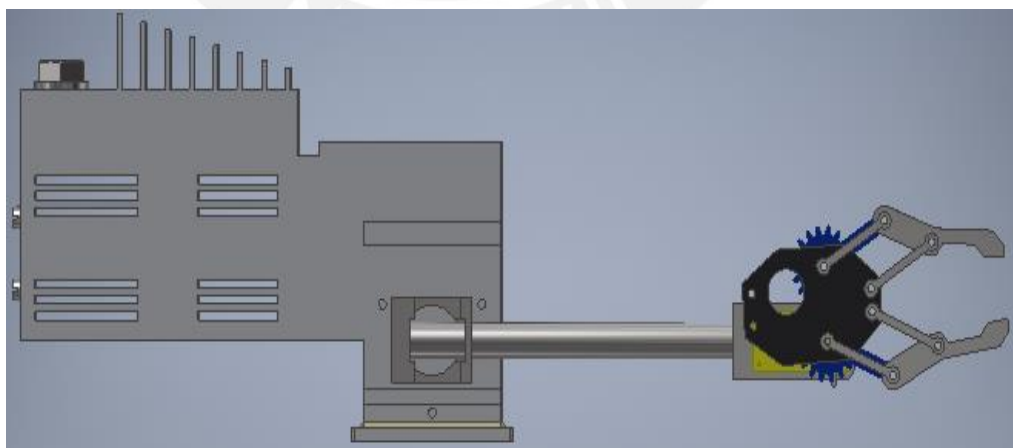


Figura 3.30 Subensamble de sujeción. Fuente: Elaboración propia

Subensamble de estabilización

El proceso del subensamble de estabilización consiste en unir mediante pines las placas de unión a la base superior (base móvil), del mismo modo, la unión del conjunto de eslabones de estabilización mediante pines entre ellos, los canales guía y deslizantes y su respectivo accionamiento mediante servomotores son fijados mediante uniones atornilladas a la base inferior (base fija).

En la figura 3.31 se muestra el subensamble de estabilización conformado por cuatro pares de eslabones diseñados para la estabilización de la base superior o base móvil. Además, cuenta cada uno con un servomotor como actuador y canales guía de tal forma que sigan una trayectoria vertical asemejándose al mecanismo biela-manivela. Se aprecia que este subensamble tiene semejanza a un robot paralelo.

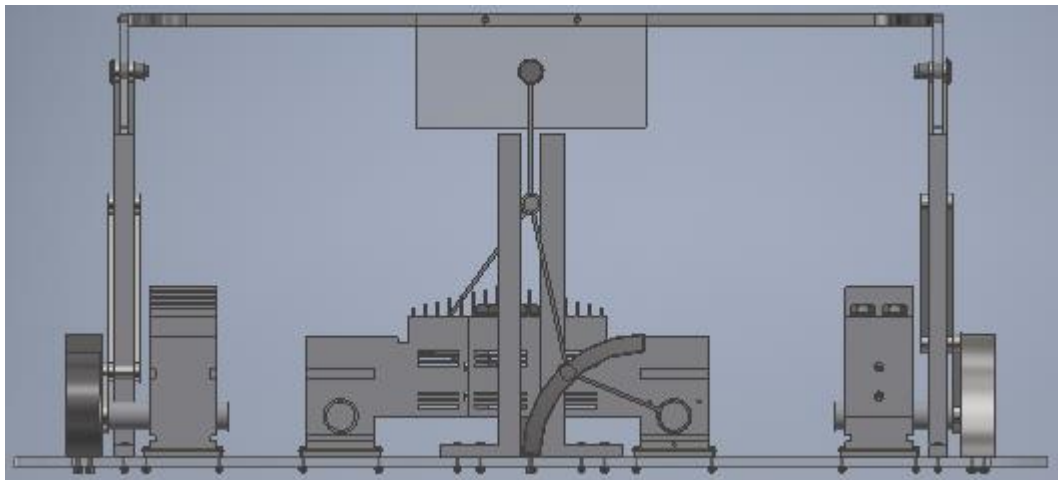


Figura 3.31 Subensamble de estabilización. Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Proceso de fabricación de las piezas importantes

Base superior (Base móvil)

En la figura 3.32 se muestra la base superior es un elemento que alberga a los sensores, la cámara y los brazos robot sujetador. También se encarga de soportar el peso del multicoptero al aterrizar. Dicha plataforma tiene un espesor de 10mm y está elaborada con material PET pues el peso de los multicopteros no es muy elevado (hasta 4kg como máximo).

El proceso de fabricación de esta pieza es mediante el moldeo por inyección para darle la forma respectiva que se muestra en la figura mencionada, además de realizar los agujeros para las uniones atornilladas mencionadas en los subensambles de sujeción y estabilización.

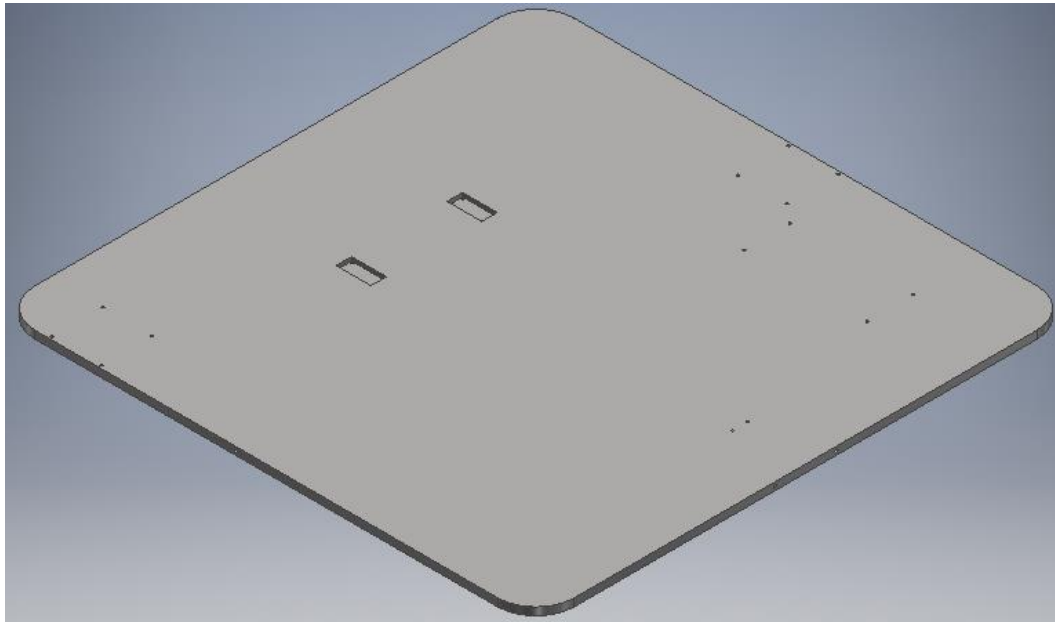


Figura 3.32 Base superior o Base móvil. Fuente: Elaboración propia

Base inferior (Base fija)

En la figura 3.33 se muestra la base inferior o también denominada base fija se encarga de soportar todo el peso completo en el que alberga al mecanismo de estabilización para poder realizar movimientos y transmitirlos a la base móvil de tal forma que se estabilice. Esta base también está hecha de material PET y cuenta con el mismo espesor que la base móvil, pero con dimensiones un poco mayores debido a que contiene la mayor cantidad de piezas mecánicas.

El proceso de fabricación de esta pieza se realiza mediante el moldeo por inyección y además se realiza los agujeros para poder realizar las uniones atornilladas con las piezas implicadas, que son principalmente las piezas del subensamble de estabilización.

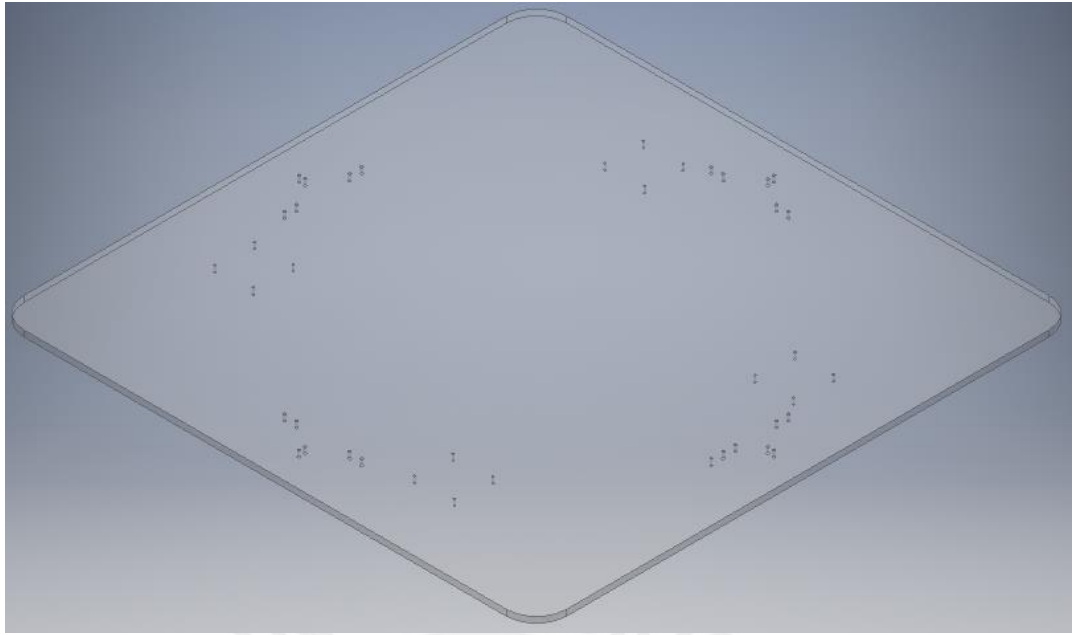


Figura 3.33 Base inferior o Base fija. Fuente: Elaboración propia

Placas de unión base móvil-eslabones de estabilización

En la figura 3.34 se muestra a la placa de unión que será la encargada de unir a los eslabones de estabilización ubicados en la base fija con la base móvil. Esta elaborado del mismo material que las bases mencionadas anteriormente. También cuenta con el mismo espesor y en total se emplean cuatro de estas para poder realizarse el movimiento de la plataforma móvil.

El proceso de fabricación es también por moldeo de inyección haciendo un agujero adecuado para el pin de unión de esta placa con los eslabones y con la base superior o móvil.

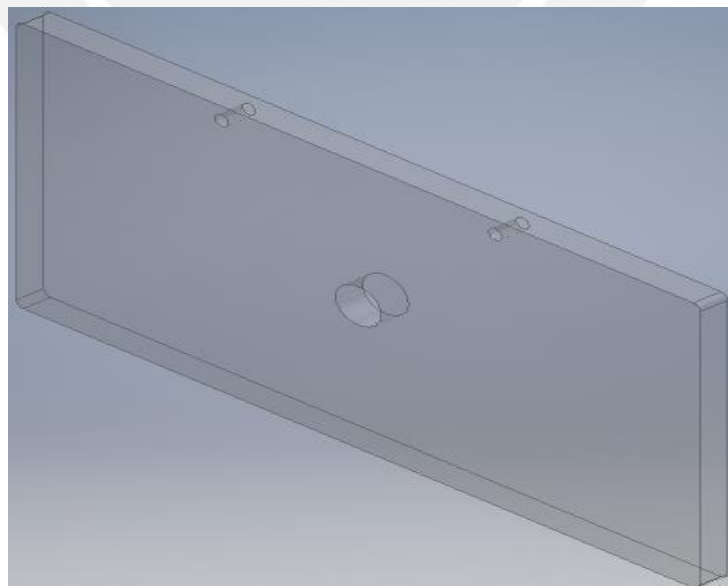


Figura 3.34 Placa de unión base móvil con eslabones de estabilización.

Fuente: Elaboración propia

Canales guía para eslabones de estabilización

En la figura 3.35 se muestra los canales guías que se emplean para poder direccionar a los eslabones de estabilización de tal forma que realicen un movimiento vertical. Dichos canales evitan la fricción con los eslabones al estar en contacto estos con un par de ruedas de tal forma que se disminuye el área de contacto. Están elaborados de material PET.

El proceso de fabricación de esta pieza es por medio del moldeo por inyección y realizando agujeros para que puedan unirse a la plataforma inferior o fija por medio de tornillos adecuados.

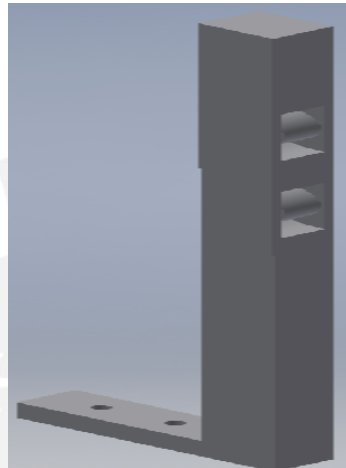


Figura 3.35 Canales guía para eslabones de estabilización. Fuente: Elaboración propia

Eslabón de estabilización

En la figura 3.36 se muestra a un eslabón de estabilización el cual se encarga de transmitir el movimiento de los servomotores situados en la base inferior hacia la base superior de manera que esta pueda moverse. En realidad, se emplean tres eslabones para la estabilización, pero como son similares a continuación se muestra sólo a uno de estos como referencia.

El proceso de fabricación de este eslabón es por moldeo de inyección al tratarse de un material plástico como el PET. Se realiza además agujeros de forma que encajen con los pines para que estos estén unidos por apriete.

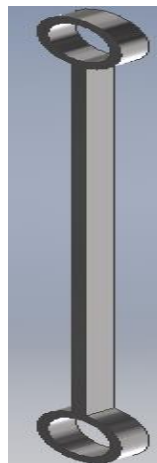


Figura 3.36 Eslabón de estabilización. Fuente: Elaboración propia

En resumen, todas las piezas mecánicas a fabricar están hechas por moldeo de inyección al ser todas de material PET, siguiendo las normas de manufactura DIN 53452, DIN 53455, DIN 53456, DIN 53457, DIN 53461 y DIN 53462. En la sección se explica detalladamente el proceso de moldeo por inyección.

3.2.5 Simulaciones

El diseño mecánico concluye con la presentación de las simulaciones realizadas por el método de los elementos finitos, el cual es empleado para verificar que el sistema de la plataforma no falle.

- **Subensamble de eslabones de estabilización**

Como se menciona en los cálculos mecánicos la principal falla que pueda producirse es el pandeo en los eslabones de estabilización. Las características del subensamble de análisis se muestran en la tabla 3.36

Tabla 3.36 Características del subensamble de eslabones de estabilización.

Fuente: Elaboración propia

Masa	0.309076 kg
Área	44939.8 mm ²
Volumen	39372.7 mm ³
Centro de gravedad	x=23.0768 mm y=96.5901 mm z=-19.3985 mm

En la figura 3.37 se muestra el par de fuerzas que actúan sobre uno de los pares de eslabones de estabilización y el peso propio del subensamble.

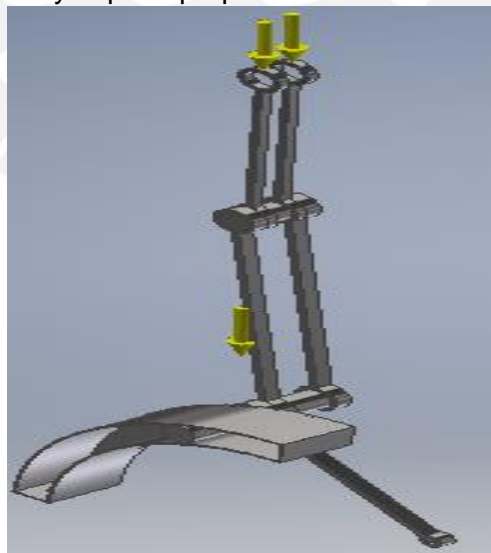


Figura 3.37 Fuerzas aplicadas al subensamble. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 3.38 el esfuerzo máximo de Von Mises es de 171.4 MPa y actúa en el eslabón superior cerca al eslabón de unión con el otro par de eslabones inferiores.

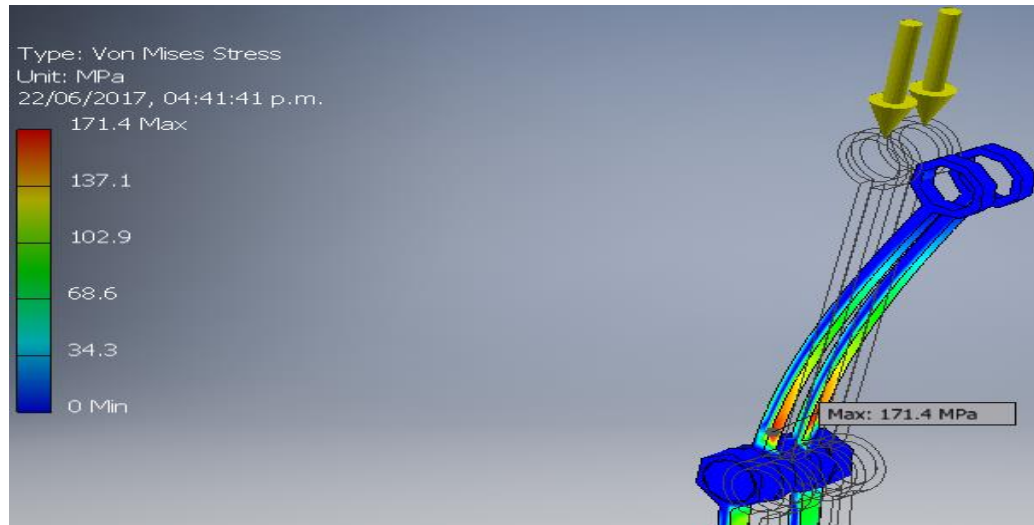


Figura 3.38 Esfuerzo máximo de Von Mises en subensamble. Fuente: Elaboración propia

Además, por medio de la simulación se muestra en la figura 3.39 que la máxima deformación es de 1.55mm situándose en la parte superior del subensamble de eslabones.

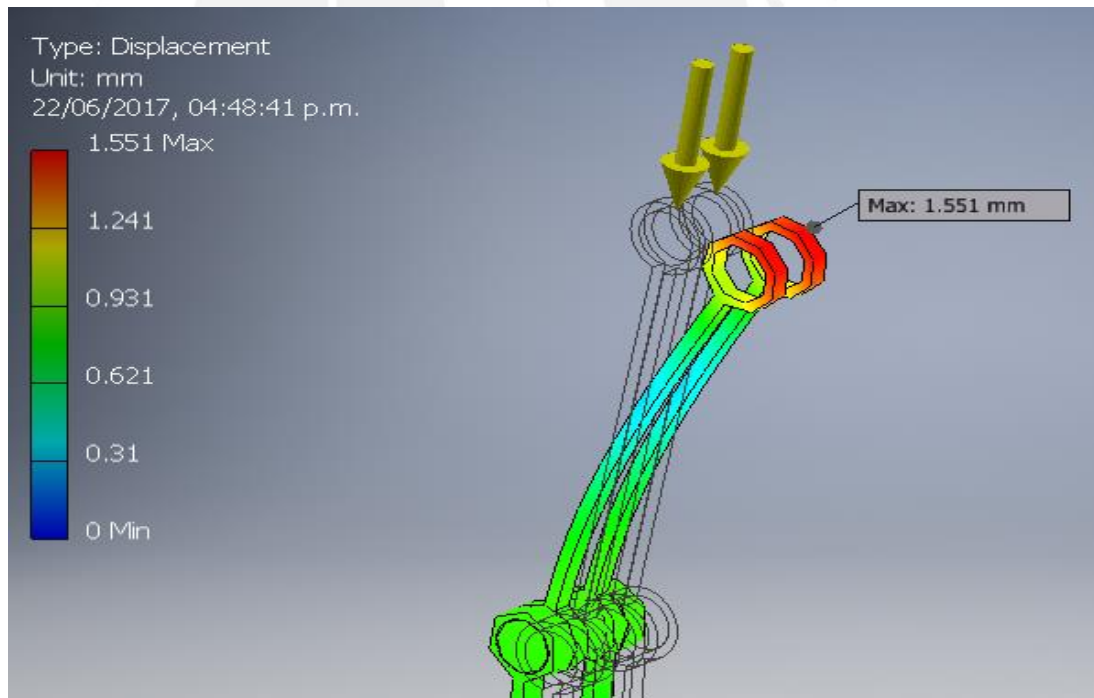


Figura 3.39 Máxima deformación del subensamble. Fuente: Elaboración propia

En cuanto al factor de seguridad de este subensamble su valor mínimo es de 1.21 lo cual cumple con la condición de seguridad ante falla por pandeo. Esto se aprecia en la figura 3.40

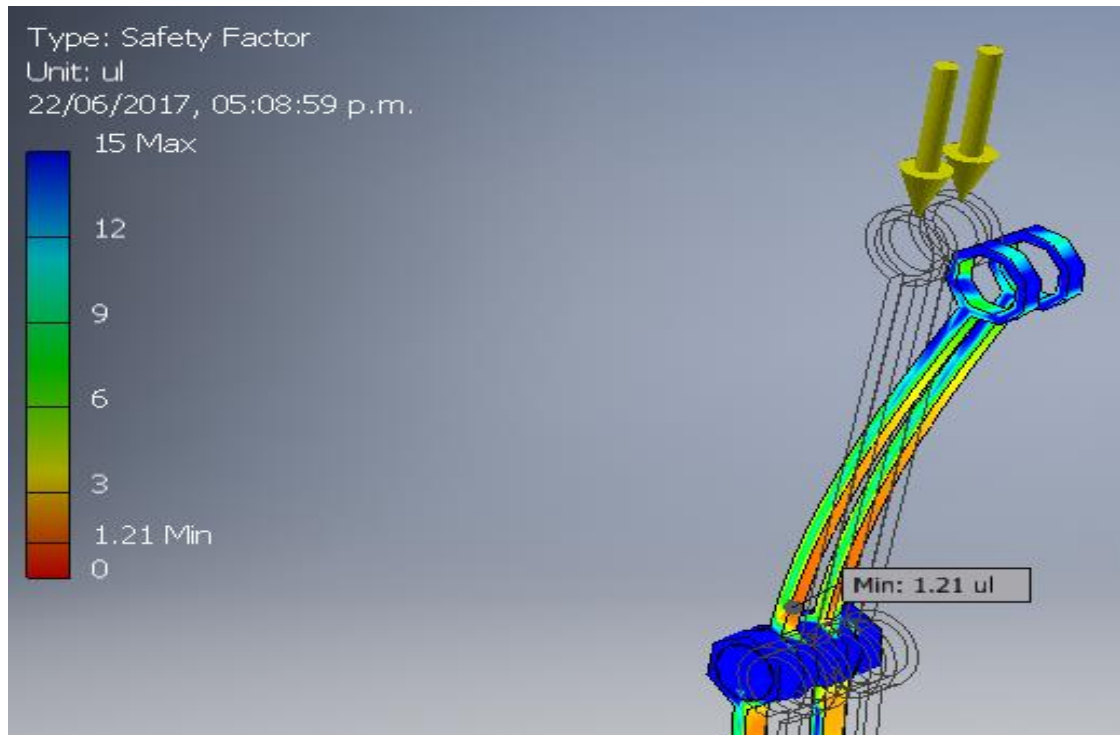


Figura 3.40 Factor de seguridad del subensamble. Fuente: Elaboración propia

- **Pin de unión de plataforma con eslabones**

Este pin de unión se encargará de transmitir el movimiento y de soportar la carga en los eslabones de estabilización cuando la plataforma superior se incline un cierto ángulo. Por lo tanto, es necesario su simulación de esfuerzos. En la tabla 3.37 se muestra las características de la pieza.

Tabla 3.37 Características del pin de unión. Fuente: Elaboración propia

Material	Acero AISI 1004
Densidad	7.85 g/cm ³
Masa	0.0442879 kg
Área	2134.93 mm ²
Volumen	5641.78 mm ³
Centro de gravedad	x=0.00000000147615 mm y=0 mm z=15.2929 mm

En la figura 3.41 se muestra la fuerza distribuida que actúa sobre el pin de unión de los eslabones con la placa que está unida a la base superior móvil.

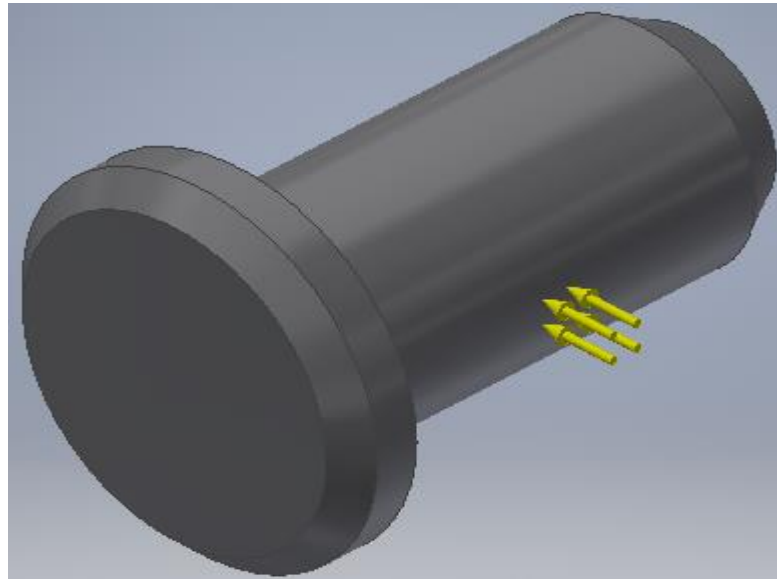


Figura 3.41 Fuerza distribuida que actúa sobre el pin de unión. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.42 se muestra el esfuerzo máximo de Von Mises el cual es de 0.4995 MPa y actúa en zona de contacto del pin con los eslabones y con la placa de unión entre estos y la base superior de la plataforma.

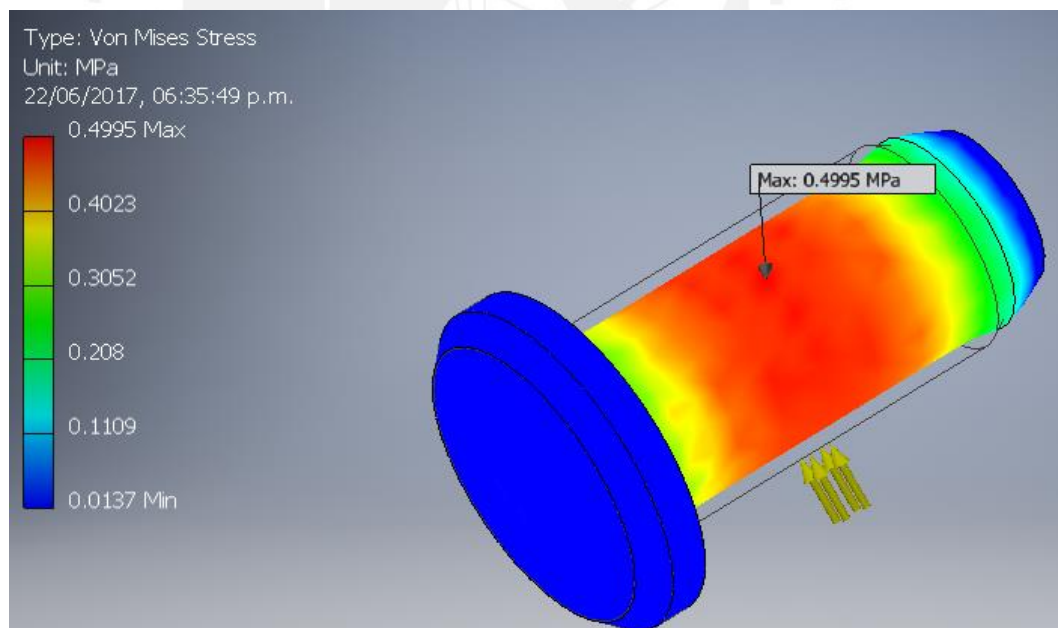


Figura 3.42 Esfuerzo máximo de Von Mises en el pin de unión. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.43 se muestra el máximo desplazamiento o deformación que tiene el pin de unión donde su valor es de 3.12×10^{-5} mm situándose en la parte final del

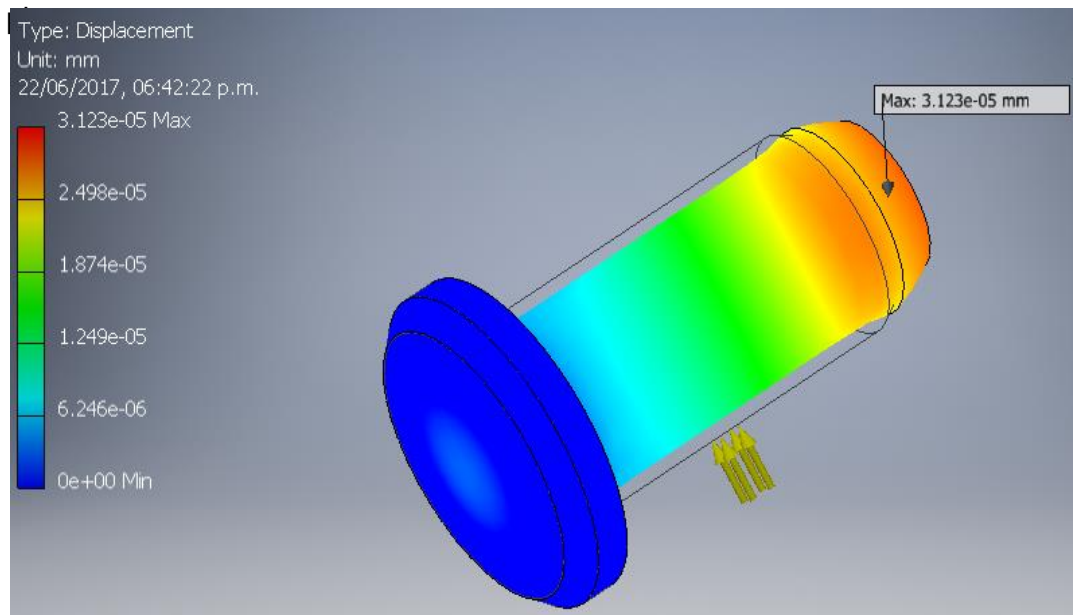


Figura 3.43 Máxima deformación o desplazamiento del pin de unión.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se muestra en la figura 3.44 el factor de seguridad del pin de unión el cual es de 15 por lo tanto cumple con la condición de seguridad y no fallará.

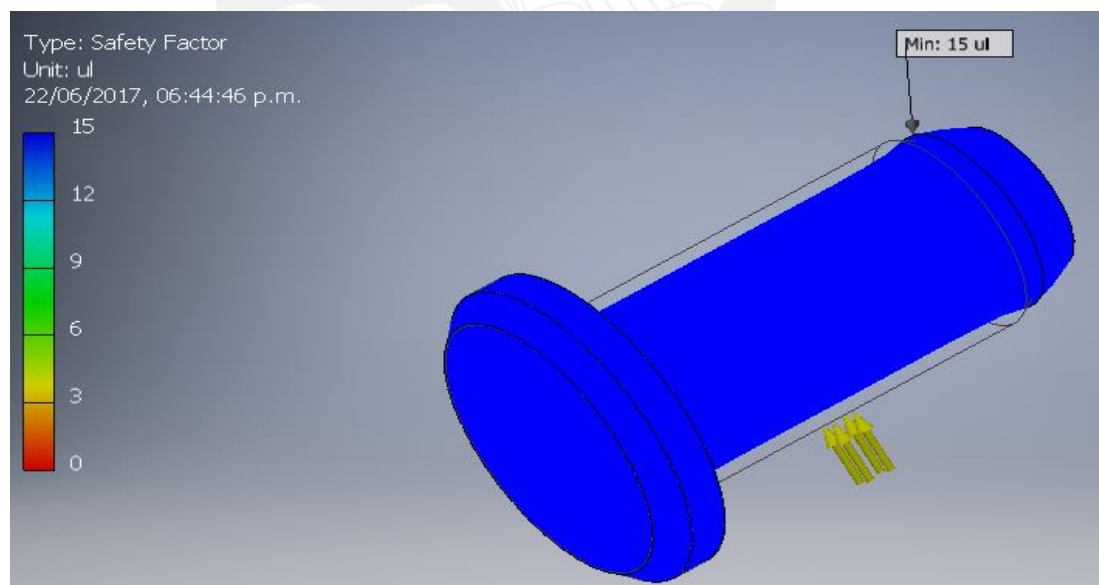


Figura 3.44 Factor de seguridad del pin de unión. Fuente: Elaboración propia

- **Base superior**

Esta pieza se encarga de soportar el peso de los brazos sujetadores del multicoptero y de albergar a la tarjeta electrónica y soportes de sensores y cámara. En la tabla 3.38 se muestran las características de la pieza.

Tabla 3.38 Características de la base superior. Fuente: Elaboración propia

Material	PET
Densidad	0.1805 g/cm ³
Masa	8.8242 kg
Área	1012300 mm ²
Volumen	4887690 mm ³
Centro de gravedad	x=0.284912 mm y=4.99542 mm z=0.0173355 mm

En la figura 3.45 se muestran las fuerzas que actúan sobre la plataforma o base superior tales como el peso del multicoptero y el propio peso de dicha base.

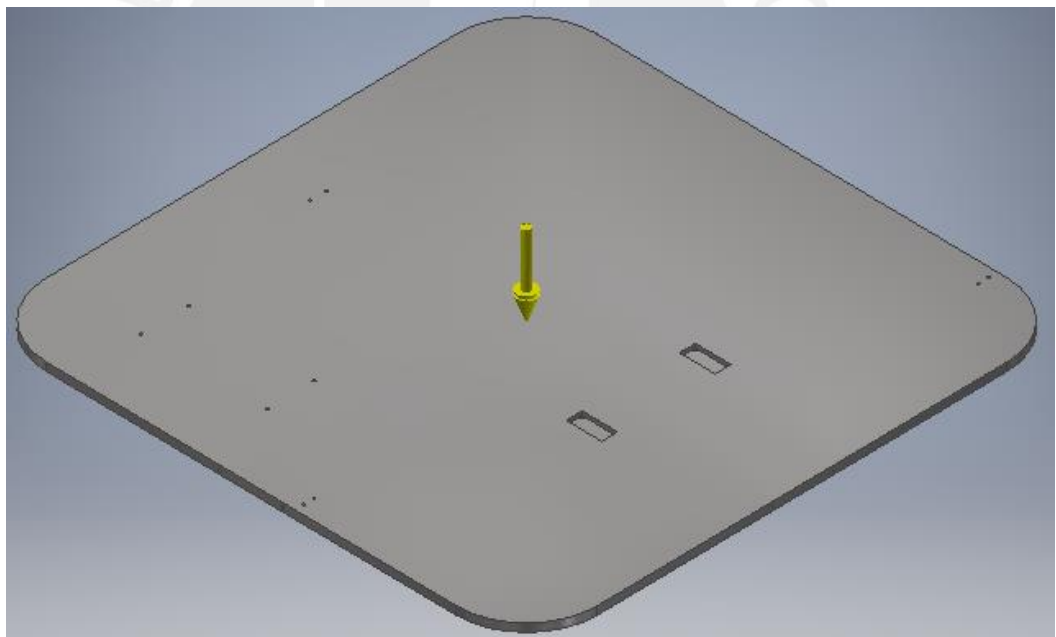


Figura 3.45 Fuerzas que actúan sobre la base superior. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.46 se muestra el esfuerzo máximo de Von Mises el cual es de 0.00114 MPa y se sitúa cerca de una de las uniones de la base superior con una placa de unión de eslabones.

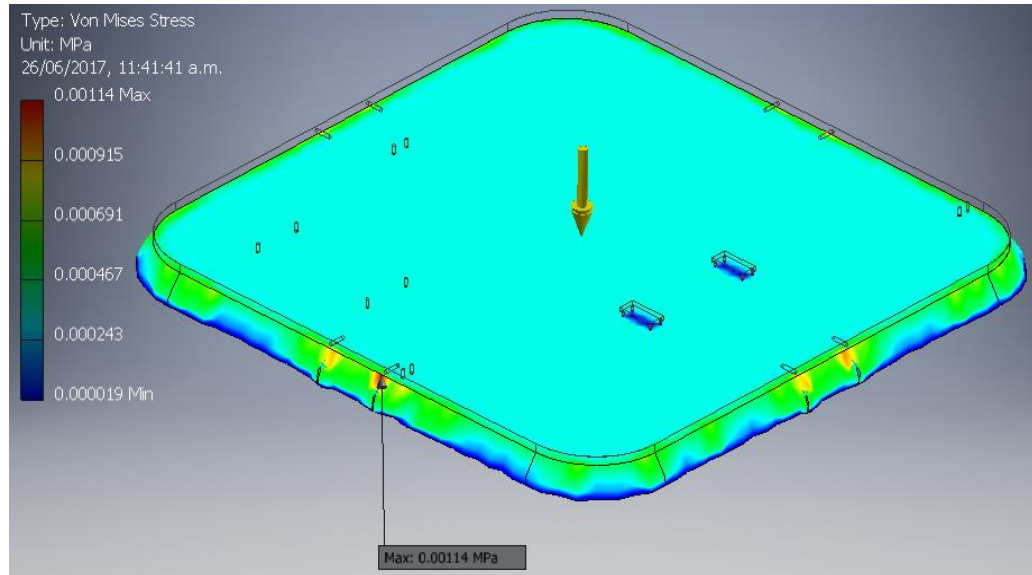


Figura 3.46 Esfuerzo máximo de Von Mises en la base superior. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente en la figura 3.47 se muestra la máxima deformación o desplazamiento en esta pieza el cual es de 2.53×10^{-8} mm ubicándose cerca a los agujeros de unión con las placas del subensamble de estabilización.

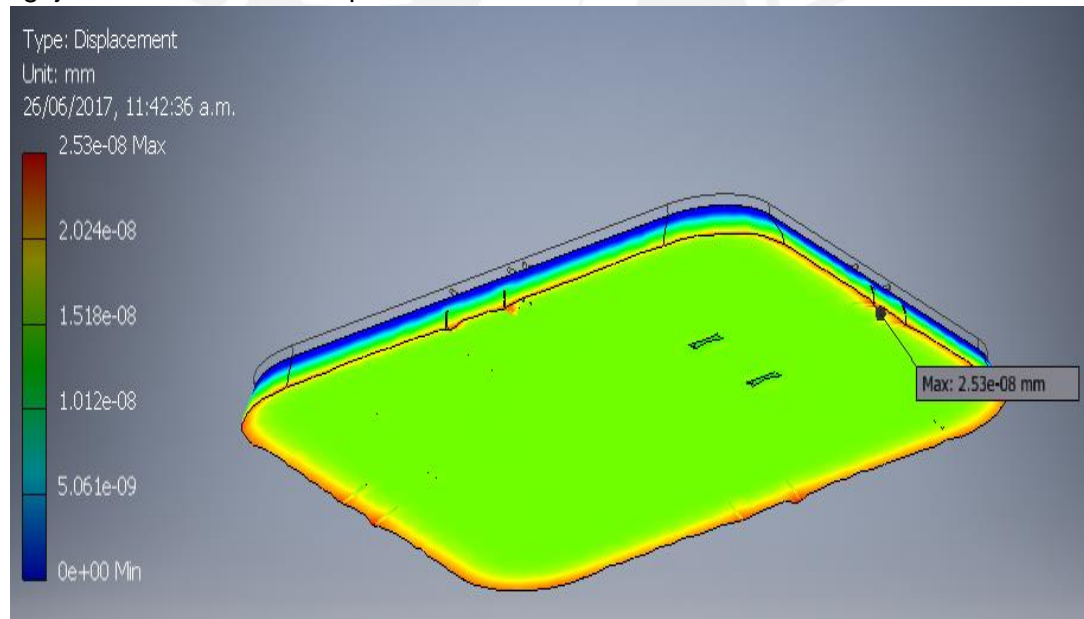


Figura 3.47 Máxima deformación de la base superior. Fuente: Elaboración propia

En cuanto al factor de seguridad de la base superior es de 15 y por lo tanto cumple con la condición de no fallar por resistencia. En la figura 3.48 se observa dicho valor.

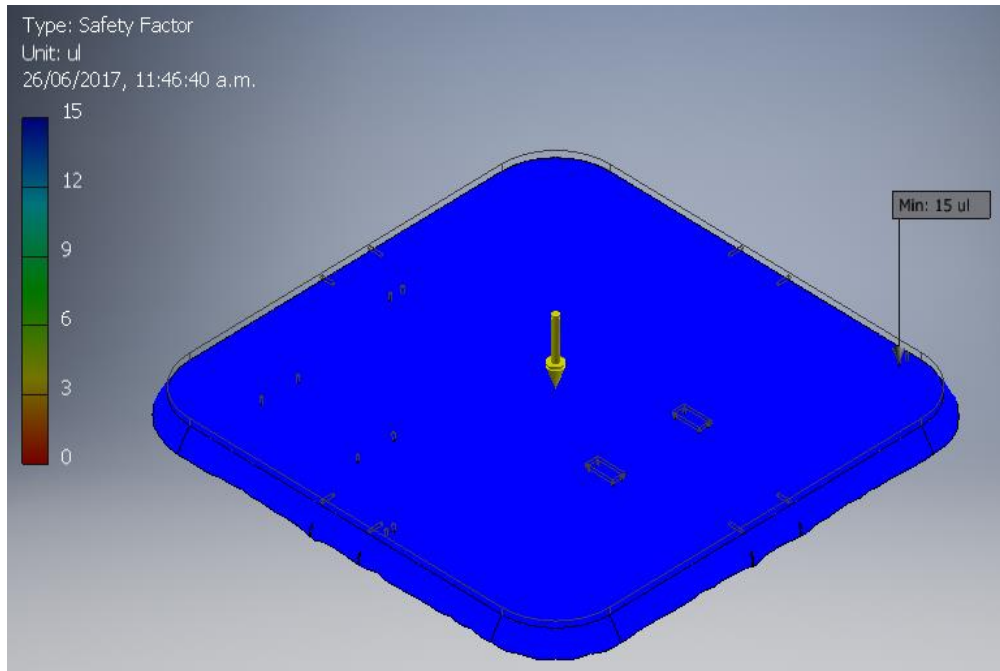


Figura 3.48 Factor de seguridad de la base superior. Fuente: Elaboración propia

- **Subensamble de sujeción**

El subensamble de sujeción se encargará de sujetar al multicoptero por medio de un gripper que sujetará las patillas de dicho multicoptero. En la tabla 3.39 se muestran las características del presente subensamble de sujeción.

Tabla 3.39 Características del subensamble de sujeción. Fuente: Elaboración propia

Masa	0.901527 kg
Área	56565.6 mm ²
Volumen	123493 mm ³
Centro de gravedad	x=-8.14298 mm y=35.9226 mm z=-120.518 mm

En la figura 3.49 se muestra las fuerzas que actúan en el subensamble de sujeción los cuales son la mitad peso del multicoptero (pues solo se analiza a uno de estos subensambles) y su propio peso.

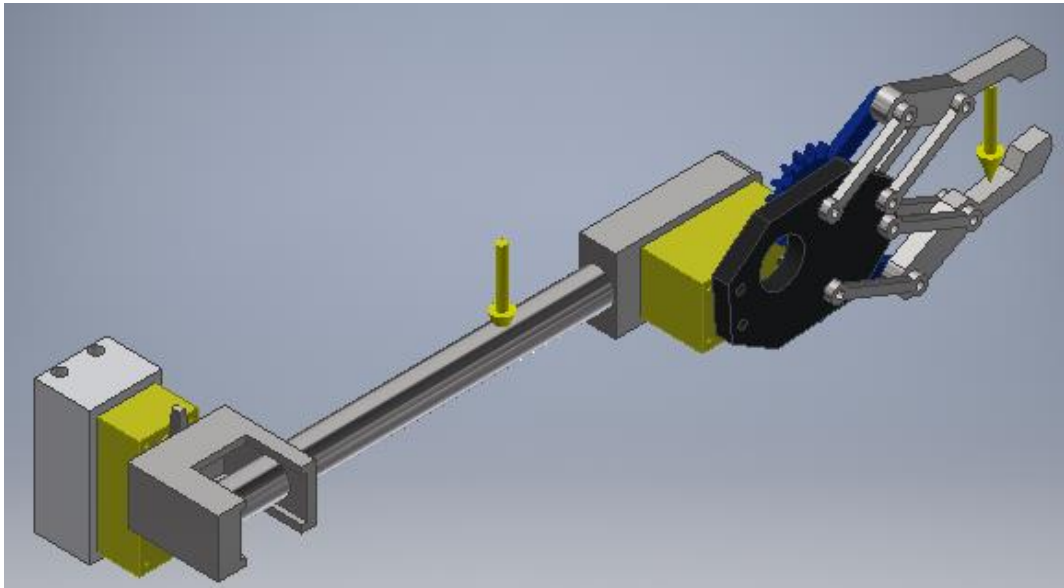


Figura 3.49 Fuerzas que actúan sobre el subensamble de sujeción. Fuente: Elaboración propia

Luego en la figura 3.50 se muestra el esfuerzo máximo de Von Mises que tiene el subensamble el cual es de 193.9 MPa y se encuentra en la unión del servomotor con el soporte del brazo sujetador.

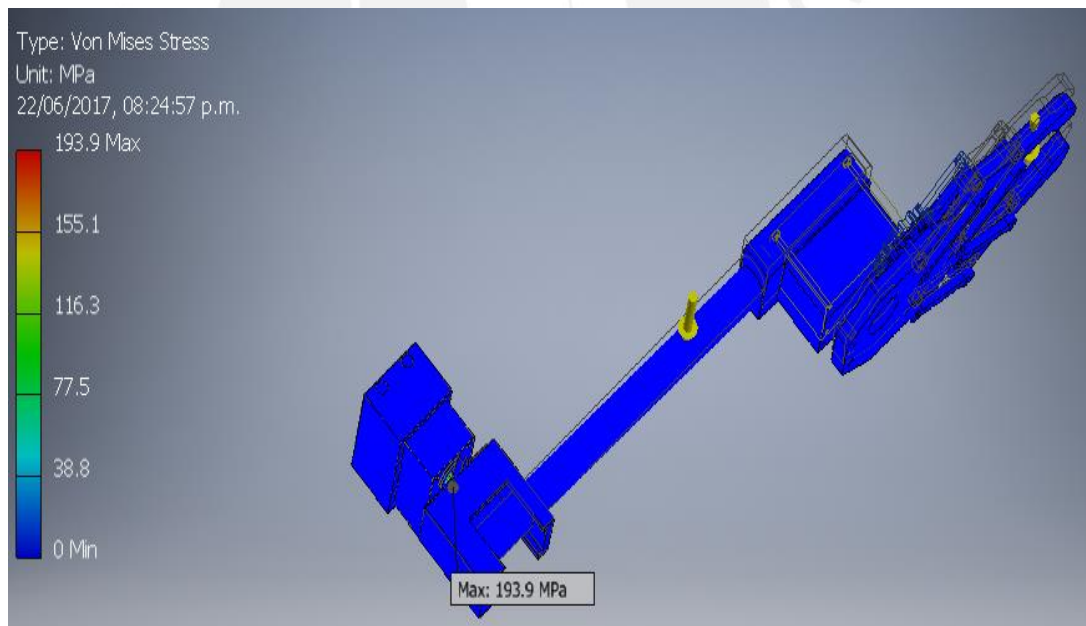


Figura 3.50 Esfuerzo máximo de Von Mises del subensamble de sujeción.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.51 se muestra la máxima deformación del subensamble de sujeción el cual es de 0.9128 mm la cual se sitúa en la parte donde se sujeta al multicoptero.

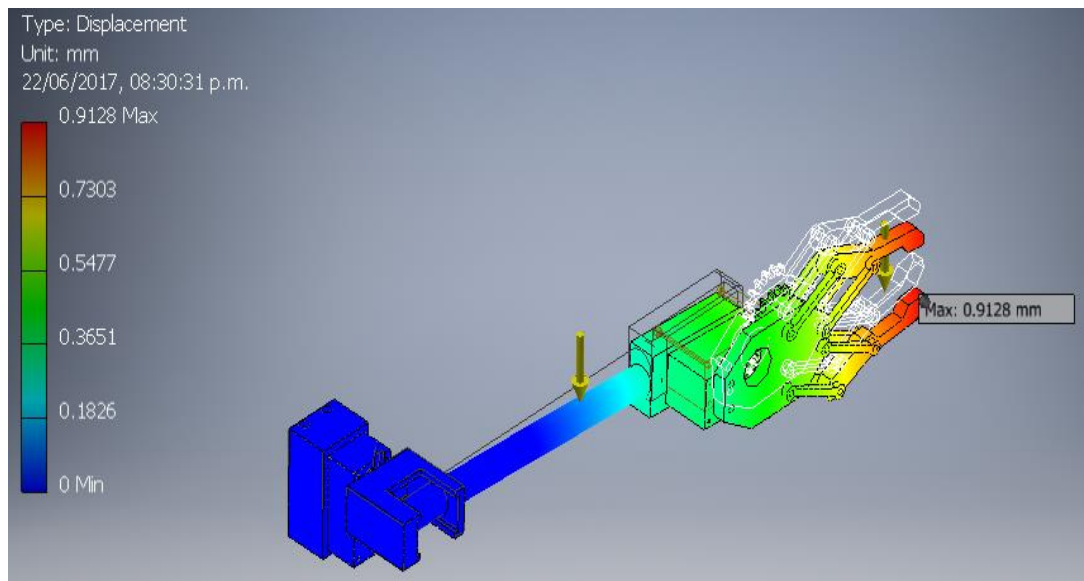


Figura 3.51 Máxima deformación o desplazamiento del subensamble de sujeción.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se muestra en la figura 3.52 el factor de seguridad del subensamble de sujeción el cual es de 1.07 que ligeramente cumple con la condición de seguridad ante falla por resistencia.

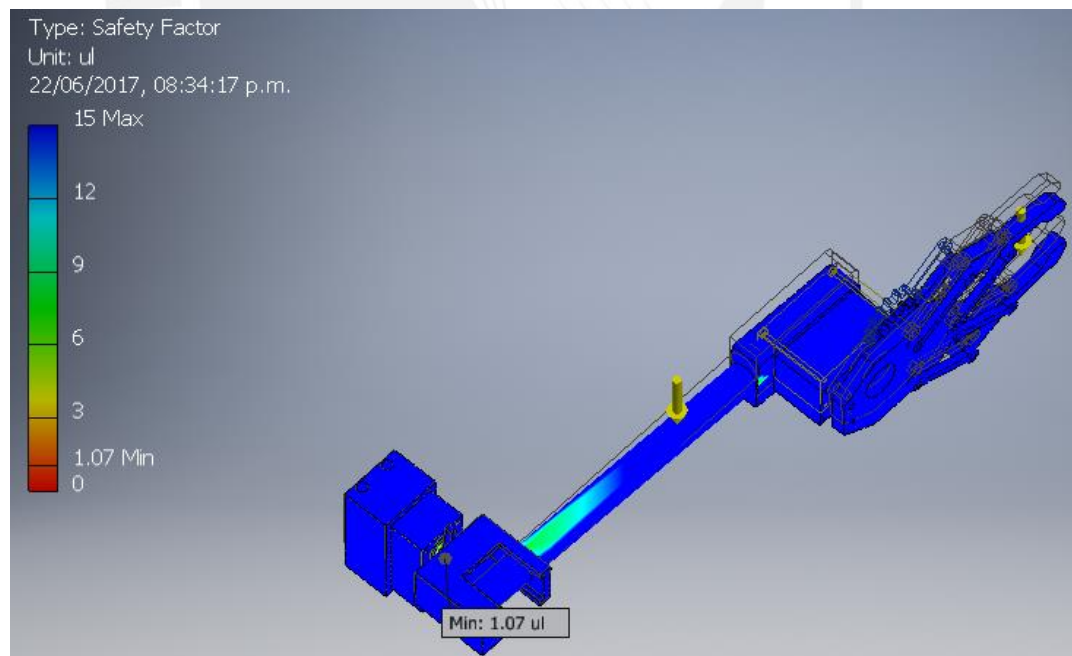


Figura 3.52 Factor de seguridad del subensamble de sujeción, Fuente: Elaboración propia

3.3 Diseño de control

En esta sección se muestran los diagramas de flujo del sistema y las estrategias de control que se realizarán en los algoritmos de control que sean empleados.

3.3.1 Diagrama de flujo del sistema

Diagramas de flujo de la plataforma

En la figura 3.53 a) se muestra el diagrama de flujo general del sistema de la plataforma que consta de dos funciones (Iniciar sistema, Iniciar Proceso de aterrizaje) y el proceso de enviar por medio de un mensaje que se concluye el aterrizaje. Por otro lado, en la figura 3.53 b) se muestra la función "Iniciar sistema" que se encarga de configurar los pines de entrada y salida del controlador de la plataforma y se inicializan las variables. En cuanto a la figura 3.53 c) se aprecia la subrutina de interrupción que se encarga de apagar el sistema mecatrónico.

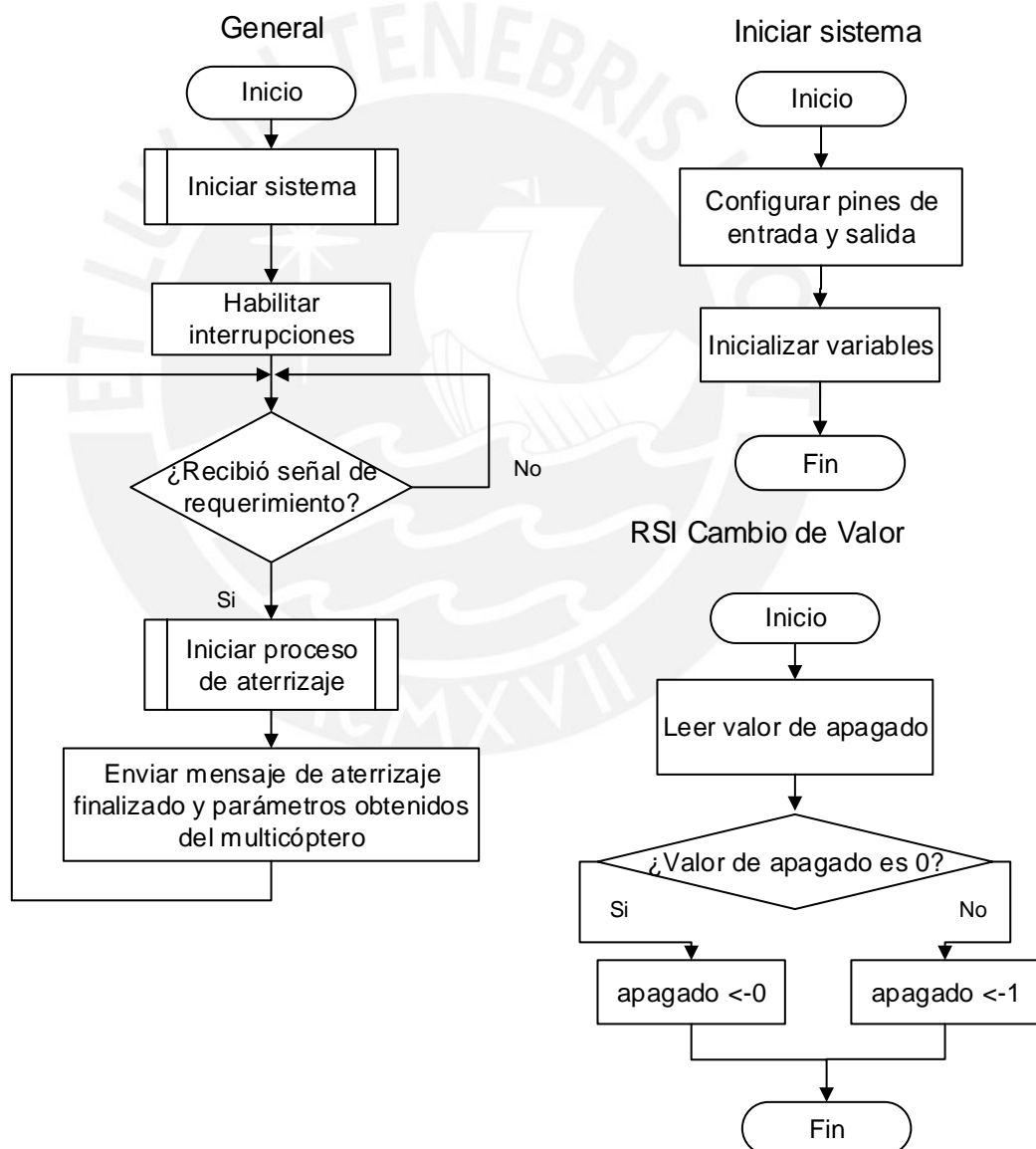


Figura 3.53 a) Diagrama de Flujo General de la Plataforma b) Función Iniciar sistema
c) Subrutina de Interrupción "Cambio de Valor"

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.54 a) se muestra la función “Iniciar proceso” de aterrizaje el cual consta de tres funciones secundarias que se detallan posteriormente. En la figura 3.54 b) se muestra la función secundaria “Estabilización y sujeción preliminar” que inicializa los valores tipo bandera de inclinación y de distancia, además se habilita interrupciones de cambio de valor hasta que las condiciones que haya en dichas subrutinas de interrupción se cumplan. Luego deshabilita dichas interrupciones y sigue el proceso de sujeción del multicoptero, el cual es detallado en la figura 3.54c) donde se envía la señal de control a los actuadores de sujeción y se agarra con los grippers al multicoptero.

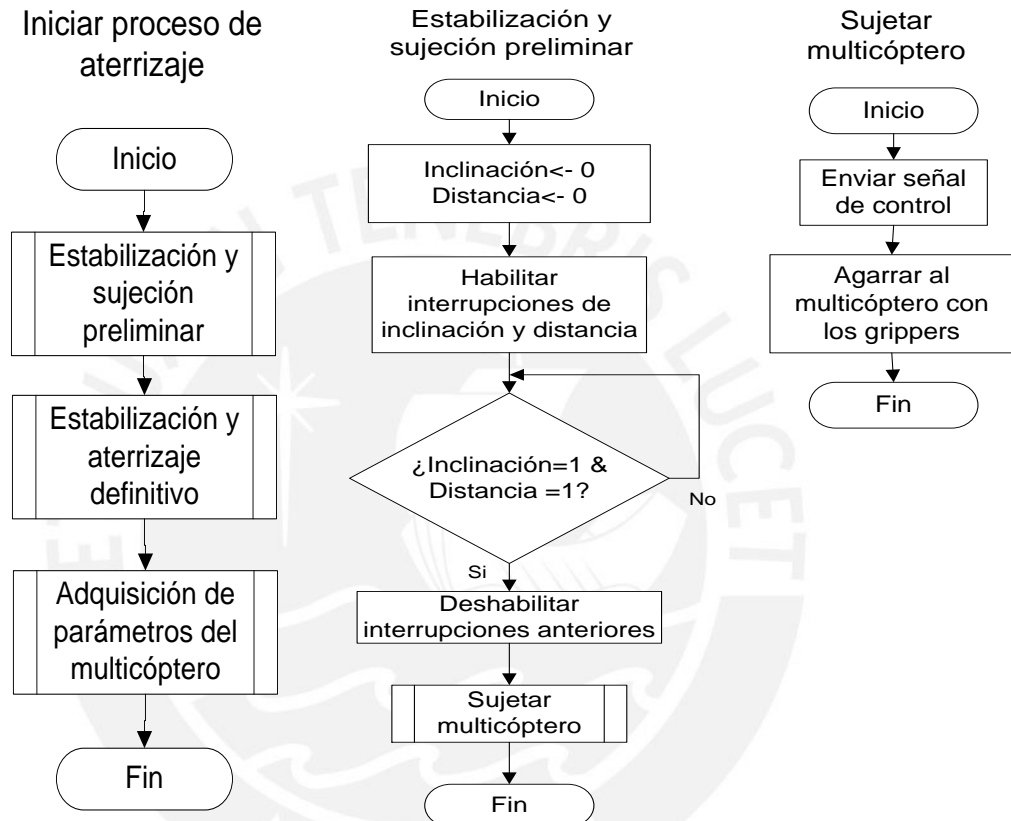


Figura 3.54 a) Función Iniciar proceso de aterrizaje b) Función secundaria Estabilización y sujeción preliminar c) Función secundaria Sujetar multicoptero. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.55 a) se muestra la subrutina de interrupción Cambio de Valor de inclinación, la cual lee el valor de inclinación de la plataforma y el valor de inclinación del kit y lo compara, si son semejantes cambia el valor de la bandera inclinación a 1 sino realiza la acción correctora de inclinar la plataforma de tal modo que tenga una inclinación semejante a la del kit. Por su parte en la figura 3.55 b) se muestra la subrutina de interrupción Cambio de Valor de distancia, la cual evalúa la distancia y cambia el valor de la bandera distancia a 1 si se cumple la condición de semejanza sino no realiza nada. Este algoritmo de interrupción a diferencia del anterior no puede realizar una acción correctora sino de verificación.

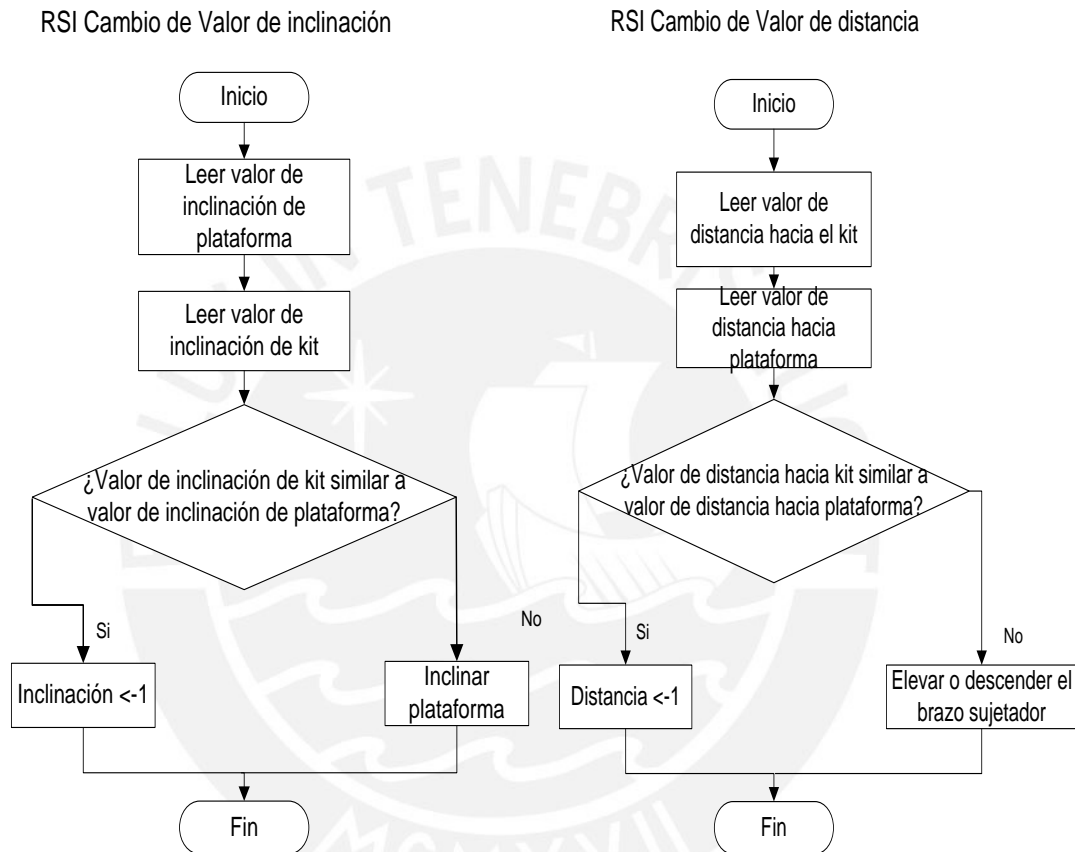


Figura 3.55 a) Subrutina de interrupción Cambio de Valor Inclinación b) Subrutina de interrupción Cambio de Valor Distancia. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.56 a) se muestra la función secundaria Estabilización y aterrizaje definitivo la cual una vez se haya sujetado al multicoptero se debe estabilizar la plataforma hasta que tenga una orientación horizontal, luego se posiciona el multicoptero a su zona de aterrizaje. En la figura 3.56 b) se muestra la función secundaria Adquisición de parámetros de multicoptero en la cual se captura una imagen del multicoptero y con el procesador de video de la RaspBerryPi3 se filtra y detecta bordes de la imagen para determinar el tipo de multicoptero. Luego se lee el estado de la batería.

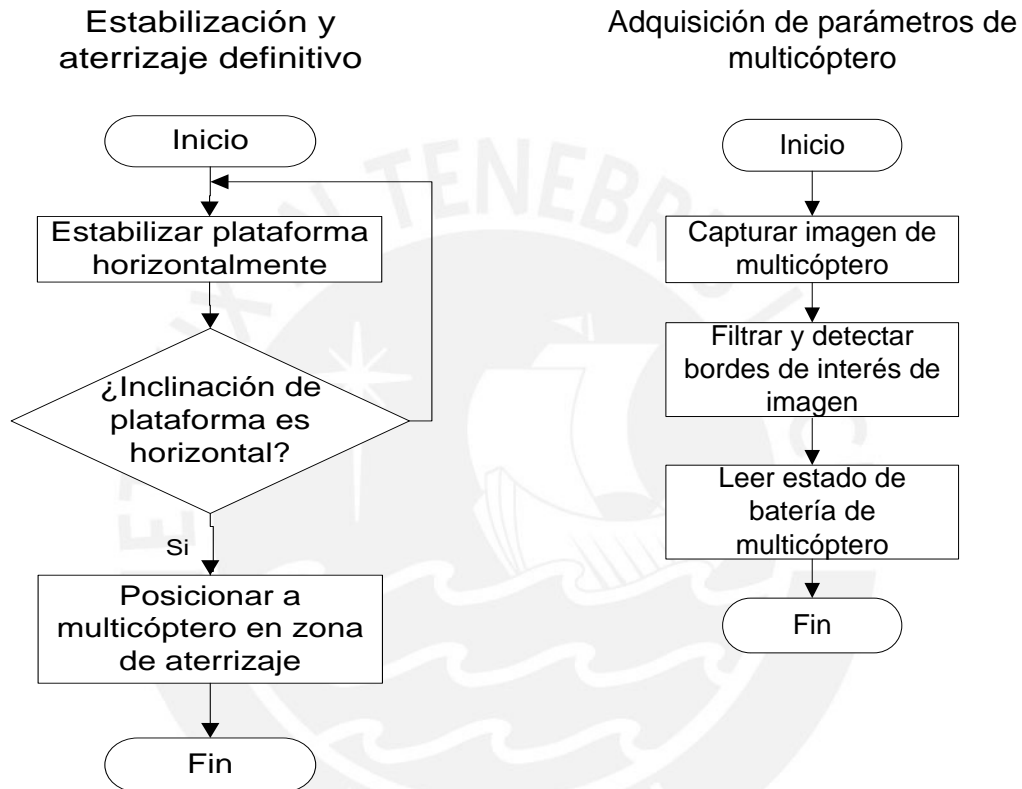


Figura 3.56 a) Función secundaria Estabilización y aterrizaje definitivo b) Función secundaria Adquisición de parámetros de multicoptero. Fuente: Elaboración propia.

Diagramas de flujo del Kit de multicoptero

En la figura 3.57 se muestra el diagrama de flujo general del kit de multicoptero en el cual se comienza configurando los pines de entrada y salida de su controlador, se inicializan variables y se leen datos de los sensores conectados a este. Luego se espera a que se reciba alguna petición de información de valor de inclinación, o de valor de distancia o el estado de la batería. Si se recibe alguna de estas peticiones se envía la información correspondiente a la plataforma.

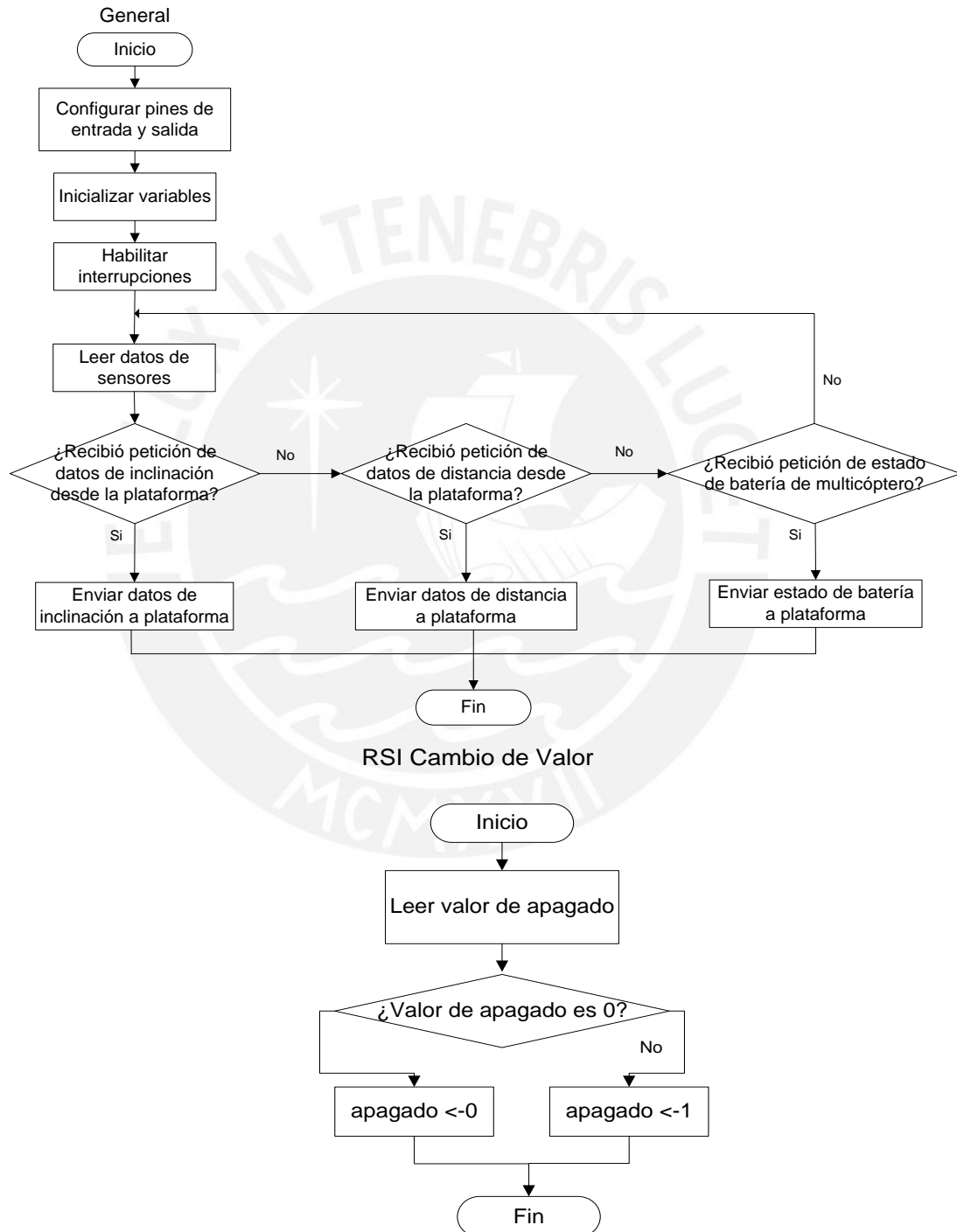


Figura 3.57 a) Diagrama de flujo general del kit de multicoptero. b) Subrutina de Interrupción “Cambio de Valor”. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Estrategias de control del sistema

Control de estabilización

Para poder realizar el control de la estabilización se utilizará el sistema de control PID.

Modelo matemático del actuador-eslabón de estabilización:

Las ecuaciones dinámicas que describen el comportamiento de un servomotor son:

$$E_a = R_a I_a + L_a \dot{I}_a + E_b,$$

$$T_m = K_t I_a,$$

$$T_m = J\ddot{\theta} + f\dot{\theta} + T_c,$$

$$E_b = K_b \dot{\theta}.$$

Luego de las ecuaciones del modelo dinámico del conjunto de eslabones de estabilización (ver capítulo 3.2.1) obtenemos el torque de carga T_c

$$T_c = 0.52(I_1 + (m_1 + 2m_2)a_1^2 + I_2 + 2m_2a_2^2 + 4m_2a_1a_2)\ddot{\theta} - (2m_1g a_1 + m_2g a_2)\theta$$

Sea:

$$\alpha = 0.52(I_1 + (m_1 + 2m_2)a_1^2 + I_2 + 2m_2a_2^2 + 4m_2a_1a_2) \text{ y } \beta = (2m_1g a_1 + m_2g a_2)$$

Para poder llevar las ecuaciones dinámicas al modelo de espacio de estados, se definen los estados.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-K_b}{L_a} & 0 \\ K_t & -f & 1 \\ \frac{1}{J + \alpha} & \frac{1}{J + \alpha} & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} E_a$$

$$[0 \quad 0 \quad a_1 + a_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [0]E_a$$

Donde:

x_1 : Corriente en la armadura

x_2 : Velocidad angular

x_3 : Posición angular

Reemplazando los valores correspondientes al servomotor y los valores ya conocidos de las variables que conforman el torque de carga T_c :

$$R_a = 10, L_a = 0.1, K_b = 0, K_t = 1, f = 0.1, J = 4.5$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -100 & 0 & 0 \\ 0.18 & -0.017 & 0.33 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} E_a$$

$$y(t) = [0 \ 0 \ 0.45] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + [0] E_a$$

$$A = \begin{bmatrix} -100 & 0 & 0 \\ 0.18 & -0.017 & 0.33 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \ 0 \ 0.45], D = 0$$

Por medio del programa MatLab obtenemos la función de transferencia del servomotor.

$$\frac{y(s)}{V(s)} = \frac{0.81}{s^3 + 100s^2 + 1.37s - 33}$$

Esta misma función de transferencia contarán los cuatro servomotores-eslabones de estabilización pues tienen los mismos valores.

Modelo matemático de la plataforma móvil

Basándome en la teoría de sistemas móviles se obtiene la ecuación dinámica de la plataforma móvil.

$$I_{pm} \ddot{\phi} = 1.4 m_{eslb} \cdot (a_1 + a_2) \ddot{\phi} - 4xf \dot{\phi} + u y_r$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4f & 0 \\ (I_{pm} - 1.4m_{eslb}(a_1 + a_2)) & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \\ 0 \end{bmatrix} y_r$$

$$\phi = [0 \ 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Donde los estados son:

x_1 : velocidad angular de la plataforma móvil

x_2 : posición angular de la plataforma móvil

Reemplazando los valores hallados (ver capítulo 3.2.1):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.59 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.7 \\ 0 \end{bmatrix} y_r$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.59 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.7 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \ 1], D = 0$$

Se obtiene el modelo de la planta donde siguiendo el diseño de control de la plataforma Stewart basándose en las siguientes fuentes: [19], [20] y [21]. Luego se procede a realizar el diagrama de bloques de control se muestra en la figura 3.58.

$$\frac{\phi(s)}{y(s)} = \frac{-0.7}{s^2 + 0.59s}$$

Bloque de cinemática directa para cada actuador:

En base a la cinemática directa realizamos las ecuaciones cinemáticas que relacionen el ángulo de inclinación con el desplazamiento vertical de cada subensamble de estabilización

a) Bloque para actuador 1

$$e_{y1} = 7 \tan(e_\phi)$$

b) Bloque para actuador 2

$$e_{y2} = 3.5 \tan(e_\phi)$$

c) Bloque para actuador 3

$$e_{y3} = 3.5 \tan(e_\phi)$$

d) Bloque para actuador 4

$$e_{y4} = 1.75 \tan(e_\phi)$$

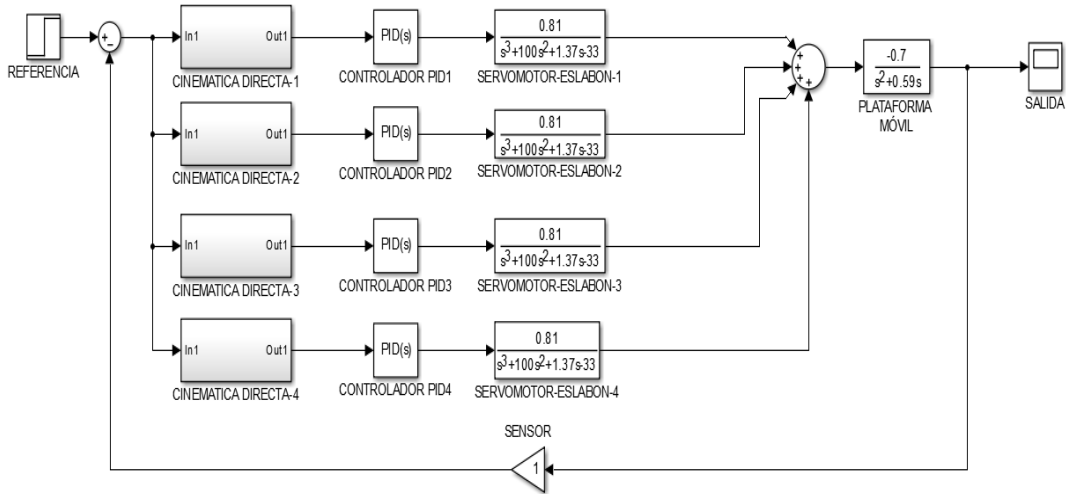


Figura 3.58 Diagrama de bloques de lazo cerrado del mecanismo de estabilización.

Fuente: Elaboración propia

El valor de las ganancias resulta de emplear la opción “Tune” del bloque de control PID el cual genera los siguientes valores:

$$[K_p, K_d, K_i] = \begin{bmatrix} 42.06 & 154.47 & 2.54 \\ -56.82 & -113 & 0 \\ -80.95 & -41.22 & 0 \\ -83.89 & -79.03 & 0 \end{bmatrix}$$

En la figura 3.59 se muestra la respuesta de la salida del mecanismo de estabilización en lazo cerrado.

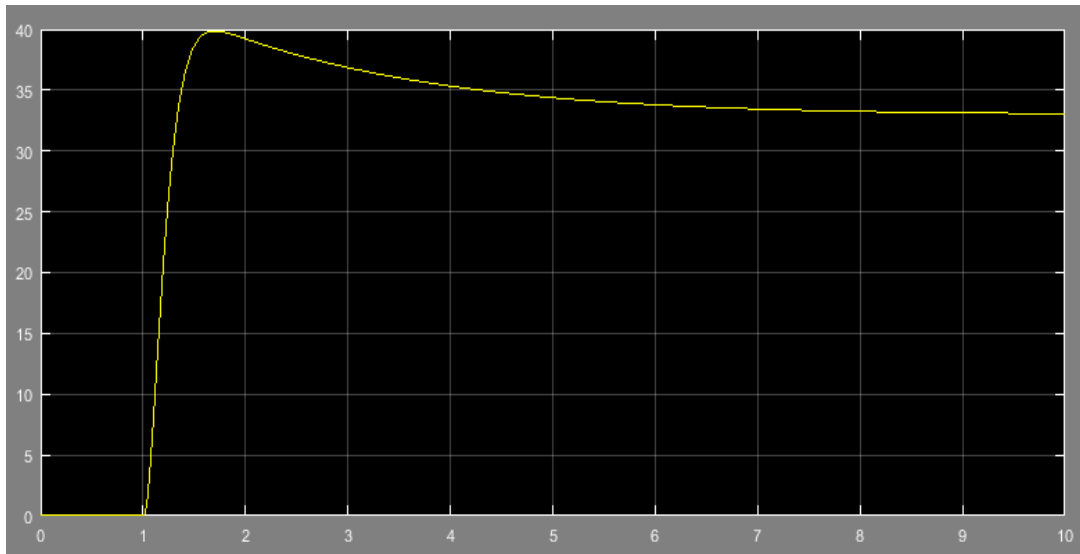


Figura 3.59 Respuesta de la salida del sistema de control de estabilización.

Fuente: Elaboración propia

Control de sujeción

Para el control del brazo de sujeción se aplicará el control PID.

Modelo matemático del actuador-brazo sujetador:

Las ecuaciones dinámicas que describen el comportamiento de un servomotor son:

$$E_a = R_a I_a + L_a \dot{I}_a + E_b,$$

$$T_m = K_t I_a,$$

$$T_m = J \ddot{\theta} + f \dot{\theta} + T_c,$$

$$E_b = K_b \dot{\theta}.$$

Luego de las ecuaciones del modelo dinámico del sujetador (ver capítulo 3.2.1) obtenemos el torque de carga T_c

$$T_c = 0.52(I_1 + (m_1 + 2m_2)a_1^2 + I_2 + 2m_2a_2^2 + 4m_2a_1a_2)\ddot{\theta} - (2m_1g a_1 + m_2 g a_2)\theta$$

Sea:

$$\gamma = 0.52(I_1 + (m_1 + 2m_2)a_1^2 + I_2 + 2m_2a_2^2 + 4m_2a_1a_2) \text{ y } \delta = (2m_1g a_1 + m_2 g a_2)$$

Para poder llevar las ecuaciones dinámicas al modelo de espacio de estados, se definen los estados.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-K_b}{L_a} & 0 \\ K_t & -f & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} E_a$$

$$[0 \quad 0 \quad a_1 + a_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [0]E_a$$

Donde:

x_1 : Corriente en la armadura

x_2 : Velocidad angular

x_3 : Posición angular

Reemplazando los valores correspondientes al servomotor y a los valores de las variables del torque de carga T_c :

$$R_a = 10, L_a = 0.1, K_b = 0, K_t = 1, f = 0.1, J = 4.5$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -100 & 0 & 0 \\ 0.22 & -0.022 & 0.45 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} E_a$$

$$y(t) = [0 \quad 0 \quad 0.34] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + [0]E_a$$

$$A = \begin{bmatrix} -100 & 0 & 0 \\ 0.22 & -0.022 & 0.45 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \quad 0 \quad 0.34], D = 0$$

Por medio del programa MatLab obtenemos la función de transferencia del servomotor junto con el sujetador.

$$\frac{y(s)}{V(s)} = \frac{0.748}{s^3 + 100s^2 + 1.75s - 45}$$

En la figura 3.60 se muestra el diagrama de bloques de control.

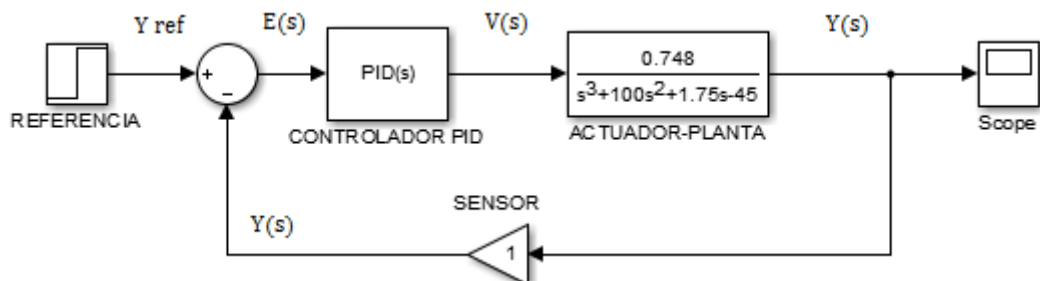


Figura 3.60 Diagrama de bloques de control de brazo sujetador. Fuente: Elaboración propia

Los valores de las ganancias resultantes se obtienen empleando la opción “Tune” del bloque de control PID que genera los siguientes valores:

$$K_p = 717.87, K_i = 189.33, K_d = 653.98$$

En la figura 3.61 se muestra la respuesta de la salida del mecanismo de estabilización en lazo cerrado.

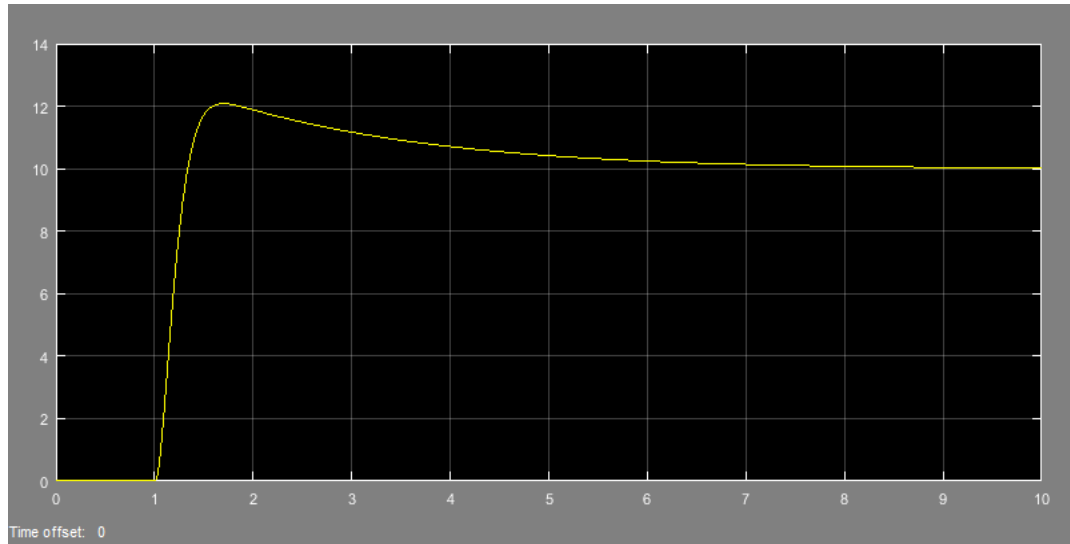


Figura 3.61 Respuesta del sistema de control del brazo sujetador. Fuente: Elaboración propia

Procesamiento de imagen

Para poder identificar el tipo de multicoptero aterrizado, se deben realizar cuatro operaciones principales de pre-procesamiento que se describen a continuación.

a) Filtrado de ruido

Todas las imágenes tienen una cierta cantidad de ruido, ya sea ocasionado por los componentes de la cámara o factores externos a esta. De cualquier forma, el ruido debe ser rechazado, ya que no forma parte de lo que sea desea analizar. Muchas técnicas de suavizado de imágenes como “Suavizado Gaussiano” o “Suavizado a través de la mediana” son de utilidad para remover el ruido presente en las imágenes. Estas técnicas tienen un principio en común, el cual es tomar una pequeña vecindad alrededor de un pixel y realizar operaciones matemáticas para reemplazar el pixel central.

b) Segmentación

Una forma de segmentar la imagen es por color y se puede realizar en varios espacios de color como RGB, HSV, entre otros más. El que se empleará en este caso será en el espacio de color RGB pues en el entorno marítimo se contará con buena iluminación.

c) Operaciones morfológicas de dilatación y erosión

Estas operaciones se realizan para manipular la forma de los objetos y generalmente se hace sobre imágenes binarias. Se busca tener una mayor nitidez, relieve y se

utiliza un kernel para la convolución de la imagen. Con la dilatación se adelgaza la imagen y con la dilatación se ensancha la imagen.

d) Delimitación de zona de interés

En el análisis de una imagen, es importante distinguir y delimitar la zona de interés y excluir el resto de la imagen. Por ejemplo, en la detección de ojos en una imagen, primero es necesario ubicar el rostro de la persona, ya que es dentro de esta zona que se debe analizar para encontrar los ojos, por lo que el resto de la imagen es excluida. En este caso, es necesario que el algoritmo sea capaz de delimitar de forma autónoma la zona de tamaño promedio en la cual que se encuentre al multicoptero. Esta parte del algoritmo primero determina los contornos de todas las áreas blancas de la imagen segmentada y posteriormente calcula el área de estas y resalta solo las que tengan un área similar al área promedio del tamaño de la imagen de un multicoptero.

Ubicación de contorno de interés

Una vez realizado las tres operaciones de pre-procesamiento se procede a realizar el algoritmo de bordes Canny de tal forma que se resalte el contorno de la imagen del multicoptero. [22]

3.4 Integración del sistema mecatrónico

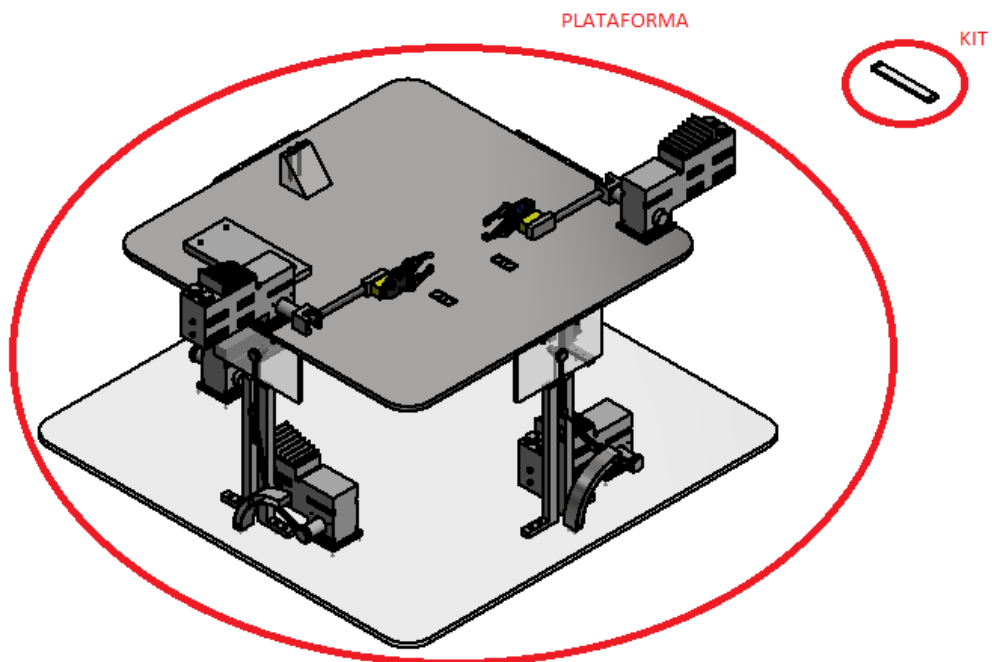


Figura 3.62 Sistema mecatrónico. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.62 se muestra al sistema mecatrónico conformado por la plataforma automática y un periférico externo al cual se le denomina Kit de multicoptero.

La parte mecánica está compuesta por dos subsistemas, el primero es el subsistema de sujeción y el segundo es el subsistema de estabilización. El primer subsistema está a su vez conformado por un par de brazos robóticos sujetadores cuyos actuadores son servomotores además de contar con un eslabón de sujeción y un

gripper en el par de brazos mencionados. El segundo subsistema está compuesto por un conjunto de cuatro ensambles de eslabones apoyados sobre una plataforma fija y compuestos de canales guía y canales deslizantes. La unión se produce por placas que estarán sujetas a la plataforma móvil y al conjunto de ensambles mencionado anteriormente los cuales se van a encargar de estabilizar dicha plataforma siendo accionados por servomotores. En cuanto a la parte electrónica, se encuentra un par de sensores de distancia o proximidad, un sensor IMU, una cámara web, un procesador de imagen, un módulo Wi-fi y la batería albergados en una tarjeta electrónica sobre la plataforma móvil.

En lo concerniente al Kit de multicoptero, su parte mecánica básicamente es una plataforma que se conecta a los soportes del multicoptero y en su interior alberga la parte electrónica los cuales son el sensor IMU, un par de sensores de proximidad y la batería para este periférico.

El funcionamiento del sistema en general consiste en detectar la presencia de un multicoptero a una determinada altura, posteriormente se genera una señal de requerimiento de aterrizaje lo cual implica la comunicación entre la plataforma y el kit del multicoptero para poder realizar el control del ángulo de inclinación de la plataforma móvil basándose en la información de la inclinación que tenga el kit. Posteriormente mediante la comunicación se controla la distancia que hay entre el sujetador y el kit, de tal forma que al realizar el control de sujeción se sujete correctamente al multicoptero. Luego se pasa a estabilizar la plataforma móvil hacia una orientación horizontal y se pasa a descender y aterrizar al multicoptero.

Finalmente se obtiene por comunicación el estado de batería del multicoptero y por medio de la cámara web y el procesador de imagen se determina el tipo de multicoptero que ha aterrizado y toda esta información es enviada a una estación remota con el fin de tener una base de datos o registro de los multicopteros que aterricen.

CAPITULO IV: COSTOS DEL SISTEMA

En este capítulo se analizan los costos que implican la implementación del sistema mecatrónico. En primer lugar, se mencionan los costos de los componentes mecánicos y electrónicos. Posteriormente se muestran los costos de fabricación y diseño de las plataformas que albergan a los componentes mencionados anteriormente.

4.1 Costos de Materiales – Parte Electrónica

En la tabla 4.1 se presenta el costo de los componentes electrónicos empleados tanto para la plataforma automática como para el kit de multicoptero.

Tabla 4.1 Costo de componentes electrónicos y otros. Fuente: Elaboración propia

Costo de Materiales - Parte Electrónica					
Item	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (S/.)	Costo Total (S/.)
1	Sensor IMU LSM9DS0*	2	und	73.36	146.71
2	Sensor Ultrasonido HC-SR04	4	und	20.00	80.00
3	Cámara Web C170	1	und	68.99	68.99
4	Arduino Mega 2560	1	und	187.00	187.00
5	RaspBerryPi 3	1	und	215.00	215.00
6	Arduino Nano	1	und	20.00	20.00
7	Modulo Wifi Esp8266	2	und	35.00	70.00
8	Batería LF121500*	1	und	1,286.87	1,286.87
9	Batería LiPo DBT*	1	und	306.49	306.49
10	Convertidor DC-DC RC122430*	1	und	126.10	126.10
11	Regulador de Tensión LM2576HV-3.3V	2	und	19.85	39.70
12	Regulador de Tensión LM2576HV-5V	1	und	19.85	19.85
13	Servomotor MCDBS*	8	und	1414.90	11,319.16
SUBTOTAL					13,885.86

Nota: Los artículos con * son importados, incluyéndose su precio con importación en la tabla.

4.2 Costo de Materiales – Parte Mecánica

En la tabla 4.2 se presenta el costo de los materiales que se emplearon para la parte mecánica y de estructura para la plataforma automática y el kit de multicoptero.

Tabla 4.2 Costo de los componentes mecánicos. Fuente: Elaboración propia

Costo de Materiales - Parte Mecánica					
Item	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (S/.)	Costo Total (S/.)
1	Tornillo M2 X 12	8	und	0.89	7.12
2	Tuerca M2	8	und	0.71	5.68
4	Tornillo M3 x 30	4	und	1.14	4.56
3	Tornillo M3 x 0.5 x 65	12	und	3.50	42.00
5	Tornillo Hexagonal M4 x 16	8	und	0.55	4.37
6	Tornillo Hexagonal M4 x 25	16	und	0.67	10.72
7	Arandela M3	32	und	0.16	5.12
8	Arandela M4	8	und	0.19	1.50
9	Tuerca Hexagonal M3	16	und	0.16	2.50
10	Tuerca Hexagonal M4	25	und	0.20	4.92
11	Pin 4 x 28	8	und	4.28	34.24
12	Pin 8 x 75	2	und	9.56	19.12
13	Pin 13.5 x 28	4	und	14.97	59.88
14	Lama de PVC 1m x 0.2m x 0.002m	1	und	8.72	8.72
SUBTOTAL					210.44

4.3 Costo de Fabricación de Piezas

Para el material principal de la estructura de la plataforma, es decir el polietileno, se emplean los siguientes procesos de manufactura:

El moldeo por inyección el cual consiste en inyectar un polímero en estado fundido en un molde cerrado a presión y frío a través de un orificio llamado compuerta. En ese molde el material se solidifica, comenzando a cristalizar en polímeros semicristalinos, donde la pieza final se obtiene al abrir el molde y sacar de la cavidad la pieza moldeada.

En la tabla 4.3 se presenta el costo del proceso de manufactura que se tiene que realizar para la fabricación de la estructura de la plataforma automática y demás accesorios.

Tabla 4.3 Costo del proceso de manufactura implicado para la fabricación.

Fuente: Elaboración Propia

Costo de Fabricación de Piezas						
Item	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (USD)	Costo Importación (USD)	Costo Total (S/.)
Proceso de Manufactura: Moldeo por Inyección						
1	Canal Deslizante	4	und	35.23	45.80	591.72
2	Canal Guía	8	und	31.42	40.85	1,055.46
3	Eslabón de Estabilización-1	4	und	32.22	41.89	541.17
4	Eslabón de Estabilización-2	8	und	27.14	35.28	911.69
5	Eslabón de Estabilización-3	8	und	27.58	35.85	926.47
6	Kit de Multicóptero	1	und	22.88	29.74	96.07
7	Soporte-1	2	und	25.75	33.48	216.25
8	Soporte-2	2	und	25.77	33.50	216.42
9	Soporte Cámara Web	1	und	50.13	65.17	210.50
10	Sujetador	2	und	30.88	40.14	259.33
11	Base Superior	1	und	110.64	143.83	464.58
12	Base Inferior	1	und	144.22	187.49	605.58
13	Eslabón de Sujeción	2	und	28.75	37.38	241.44
14	Eslabón de Unión-1	4	und	31.55	41.02	529.91
15	Eslabón de Unión-2	4	und	28.35	36.86	476.17
16	Placa de Unión	4	und	18.79	24.43	315.60
17	Estructura de Tarjeta Electrónica	1	und	17.61	22.89	73.94
SUBTOTAL						7,732.29

4.4 Costo de diseño

El sueldo mensual de un practicante profesional en ingeniería mecatrónica fluctúa entre 2100 y 2900 soles [23] [24], por lo tanto, el costo de diseño por hora fluctúa entre 8.75 y 12.10 soles.

Por lo tanto, como este trabajo de diseño e investigación demandó 10 semanas de 5 días cada una con 6 hora útiles por día el costo de diseño resulta entre 2625 y 3630 soles, es decir un promedio de **3,127.5** soles.

4.5 Costo total

Se muestra el resumen de costo total que implica la elaboración total de la plataforma automática.

Tabla 4.4 Costo total de la plataforma automática. Fuente: Elaboración propia

Resumen de Costos				
Item	Descripción	Cantidad	Unidad	Subtotal (S/.)
1	Costo de Materiales - Parte Electrónica	1	glob	13,885.86
2	Costo de Materiales - Parte Mecánica	1	glob	210.44
3	Costo de Fabricación de Piezas	1	glob	7,732.29
4	Costo de Diseño	1	glob	3,127.50
TOTAL				24,956.10



CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de haber realizado el diseño del presente sistema mecatrónico se han llegado a las siguientes conclusiones:

1. El diseño del sistema mecatrónico cumple con los requerimientos planteados en la lista de exigencias (ver Anexo A.1) y se puede comprobar al revisar el presente trabajo comparando las características con que cuenta el sistema mecatrónica con los requerimientos que se solicitó en el capítulo 1. Sin embargo, fue necesario emplear un periférico externo al sistema para que opere de manera más eficiente y cumpla su objetivo principal.
2. La metodología que se ha empleado tuvo como consecuencia que se facilite el diseño del sistema mecatrónico basándose en un concepto de solución óptimo a partir de la información que aparece en la bibliografía.
3. Se consiguió diseñar el sistema de control tanto para la sujeción como para la estabilización de la plataforma.
4. El sistema mecatrónico diseñado logra satisfacer las necesidades y el alcance del problema planteado además de ser un prototipo único, pues no existe actualmente en el mercado plataformas para embarcaciones marinas.

Adicionalmente, se mencionan las principales recomendaciones:

1. Para facilitar aún más el diseño mecánico del sistema se recomienda emplear un diseño modular basado en subsistemas de tal forma que se facilite la formación del sistema mediante la unión los subsistemas.
2. Se recomienda realizar varios conceptos de solución (mínimo 3) para poder llegar a una solución óptima.
3. Se recomienda realizar simulaciones adicionales pues de esta manera se asegura el funcionamiento real del sistema mecatrónico puesto que en este trabajo no se desarrolló un prototipo físico sobre el presente sistema.

BIBLIOGRAFÍA

[1] DRONE SPAIN

Drone Spain. Consulta: 16 de Mayo del 2017.

<http://dronespain.pro/uso-drones-en-seguridad/>

[2] RADIO PROGRAMAS DEL PERÚ

Radio Programas del Perú. Consulta: 14 de Julio del 2017

<http://rpp.pe/economia/economia/peru-usara-drones-para-evitar-ingreso-de-barcos-pesqueros-extranjeros-noticia-1028046>

[3] GESTIÓN

Gestión. Consulta: 14 de Julio del 2017.

<https://gestion.pe/tendencias/regularan-drones-casos-tendra-tramitar-licencia-operarlos-136982>

[4] PARKER, Steven

2015 *Drone Landing on a Boat* [videograbación]. México: Youtube. Consulta: 15 de mayo del 2017.

<https://www.youtube.com/watch?v=cdwbjVYFges>

[5] TOKACH, Kenneth

2014 *DJI Drone Crash* [videograbación]. Estados Unidos: Youtube. Consulta: 15 de mayo del 2017.

<https://www.youtube.com/watch?v=UOAYTy44uIE>

[6] REZELJ, Anzel.

2013 *Carga autónoma de un multicoptero al aterrizar en una plataforma móvil*. Eslovenia.

[7] MORESVE, Julien

2013 *Sistema para guiar a un drone en fase de aproximacion en una plataforma naval*. Estados Unidos.

[8] FERNÁNDEZ, Marcos.

2016 *Desarrollo de un sistema de aterrizaje autónomo sobre una plataforma de carga para un UAV tipo Parrot AR.Drone2*. España.

[9] GARCÍA, Manuel; GÓMEZ, Pablo.

2015 *Sistema de Asistencia al Aterrizaje de Drones*. Proyecto de Investigación. Vigo: Universidad de Vigo.

[10] H3 DYNAMICS

H3 Dynamics. Consulta: 20 de Marzo del 2017.

<http://h3dynamics.com/products/drone-box/>

[11] AUTOMATED INDUSTRIAL DRONES

Automated Industrial Drones. Consulta: 16 de Marzo del 2017.

<http://www.airobotics.co.il/>

[12] WIBOTIC

WiBotic. Consulta 24 de Mayo del 2018.

<https://www.wibotic.com/development-kit/>

[13] BRIONES, Juan.

2009 *Diseño, análisis y construcción de un robot paralelo*. Querétaro, México.

[14] ONODERA, Takayuki.

2013 *Design and development of Stewart platform-type assist device for ankle-foot rehabilitation*. Estados Unidos.

[15] RASHID, Muhammad.

2004 *Electrónica de Potencia*, Tercera edición. Estados Unidos: Pearson Education. pp. 186-190.

[16] SHIGLEY, Joseph

2001 *Teoría de máquinas y mecanismos*, Primera edición. Estados Unidos: Mc Graw Hill. pp. 450-500.

[17] SHABANA, Ahmed

2013 *Dynamics of multibody systems*, Cuarta Edición. Inglaterra: Cambridge

University Press. pp. 28-61.

[18] RODRÍGUEZ, Jorge

2015 *Resistencia de Materiales 2*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. pp. 21-34.

[19] ARISTIZABAL, Daniel

2015 *Control de una Plataforma Stewart*. Bogotá, Colombia.

[20] FONG, Terrence

1990 *Design and testing of a Stewart Platform Augmented Manipulator for Space Applications*. Estados Unidos.

[21] SANTOSO, Indrawanto

2009 *Design and Control of the Stewart Platform Robot*. Estados Unidos.

[22] GONZALES, Roberto

2006 *Procesamiento de Imágenes digitales*, Tercera edición. Estados Unidos: Pearson Education. pp. 728-747.

[23] 2000 CARRERAS

2000 *Carreras*. Consulta: 19 de Mayo del 2018.

<https://www.2000carreras.com/2017/06/cuanto-gana-un-ingeniero-mecatronico.html>

[24] RADIO PROGRAMAS DEL PERÚ

Radio Programas del Perú. Consulta: 20 de Mayo del 2018.

<http://rpp.pe/lima/actualidad/cuanto-gana-un-egresado-segun-carrera-y-universidad-noticia-948771>