

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**Facultad de Ciencias e Ingeniería**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**DISEÑO DE HEXACÓPTERO AUTÓNOMO PARA MANTENIMIENTO EN  
LÍNEAS ELÉCTRICAS**

**Tesis para optar el título de Ingeniero Mecatrónico, que presenta el bachiller:**

**Heser Harold León Reyes**

**ASESORA: Ing. Mónica Lucía Abarca Abarca**

**Lima, julio del 2018**



*A Dios, mis padres, hermanos, familiares y amigos*

*por su constante apoyo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En la presente sección deseo manifestar mi agradecimiento sincero a las personas que me ayudaron en este camino hacia la vida profesional.

En primer lugar, a mis padres y hermanos que nunca pierden la fe y siempre están conmigo en los buenos momentos y en los malos, dándome motivación y aliento para seguir adelante.

A mi madrina por haberme dado un hogar en Lima y dejarme disfrutar de él.

A mis amigos y profesores por su apoyo, consejos y confianza hacia mí.



## RESUMEN

El mantenimiento predictivo en líneas eléctricas es un trabajo necesario pues este garantiza que los usuarios de energía eléctrica tengan un servicio de calidad. Este trabajo se realiza con cámaras termográficas o de efecto corona ya que estas detectan potenciales fallos en las líneas. Las líneas eléctricas recorren todo tipo de terrenos, incluso algunos no accesibles por tierra, por lo que este mantenimiento se lleva a cabo usando helicópteros y vehículos todo terreno, lo que lo hace costoso, lento e ineficiente considerando que las líneas eléctricas se tienden por miles de kilómetros. Actualmente, también se hace uso de vehículos aéreos no tripulados para llevar a cabo este mantenimiento; sin embargo su operario debe volarlo a la vez que reconoce las fallas, por lo que este método también puede resultar lento y a la vez riesgoso para el sistema, pues el operario lo puede llevar cerca de las líneas eléctricas y dañar sus circuitos debido al campo magnético de estas.

En el presente trabajo se buscó hacer un mantenimiento predictivo basado en termografía en líneas de alta y media tensión más rápido, sencillo, seguro y menos costoso comparado con los métodos convencionales para las empresas mediante el uso de un hexacóptero autónomo que lo lleve a cabo. Para poder lograr lo propuesto se hizo uso de una cámara termográfica que detecta los posibles fallos en las líneas, además de una cámara de profundidad que le da autonomía al sistema ya que con esta se pueden seguir las líneas, evitar obstáculos, mantenerse a una distancia preestablecida del suelo, entre otras características.

Este sistema puede realizar la inspección a 30km/h, no necesita de operarios que lo manejen, se mantiene a una distancia segura de las líneas y a largo plazo resulta ser menos costoso que transportarse en helicóptero o en vehículos todo terreno para realizar la inspección.



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

Título : DISEÑO DE HEXACÓPTERO AUTÓNOMO PARA  
MANTENIMIENTO EN LÍNEAS ELÉCTRICAS  
Asesor : ABARCA ABARCA, MÓNICA LUCÍA  
Alumno : LEÓN REYES, HESER HAROLD  
Código : 20112270  
Tema N° : # 131  
Fecha : 30 de junio del 2016



**Descripción y Objetivos**

El mantenimiento predictivo en líneas eléctricas es un trabajo necesario pues este garantiza que los usuarios de energía eléctrica tengan un servicio de calidad. Este trabajo se realiza con cámaras termográficas o de efecto corona ya que estas detectan potenciales fallos en las líneas. Las líneas eléctricas recorren todo tipo de terrenos, incluso algunos no accesibles por tierra, por lo que este mantenimiento se lleva a cabo usando helicópteros y vehículos todo terreno, lo que lo hace costoso, lento e ineficiente considerando que las líneas eléctricas se tienden por miles de kilómetros. Actualmente, también se hace uso de vehículos aéreos no tripulados para llevar a cabo este mantenimiento; sin embargo su operario debe volarlo a la vez que reconoce las fallas, por lo que este también resulta ser lento y a la vez riesgoso para el sistema, pues el operario lo puede llevar cerca de las líneas eléctricas y dañar sus circuitos debido al campo magnético de estas.

En el presente trabajo se buscó hacer un mantenimiento predictivo en líneas de alta y media tensión más rápido, sencillo, seguro y menos costoso comparado con los métodos convencionales para las empresas mediante el uso de un hexacóptero autónomo que lo lleve a cabo. Para poder lograr lo propuesto se hizo uso de una cámara termográfica que detecta los posibles fallos en las líneas, además de una cámara de profundidad que le da autonomía al sistema ya que con esta se pueden seguir las líneas, evitar obstáculos, mantenerse a una distancia preestablecida del suelo, entre otras características.

Este sistema puede realizar la inspección a 30km/h, no necesita de operarios que lo manejen, se mantiene a una distancia segura de las líneas y a largo plazo resulta ser menos costoso que transportarse en helicóptero o en vehículos todo terreno para realizar la inspección.

*Máximo: 100 páginas*

  
Mónica Lucía Abarca Abarca

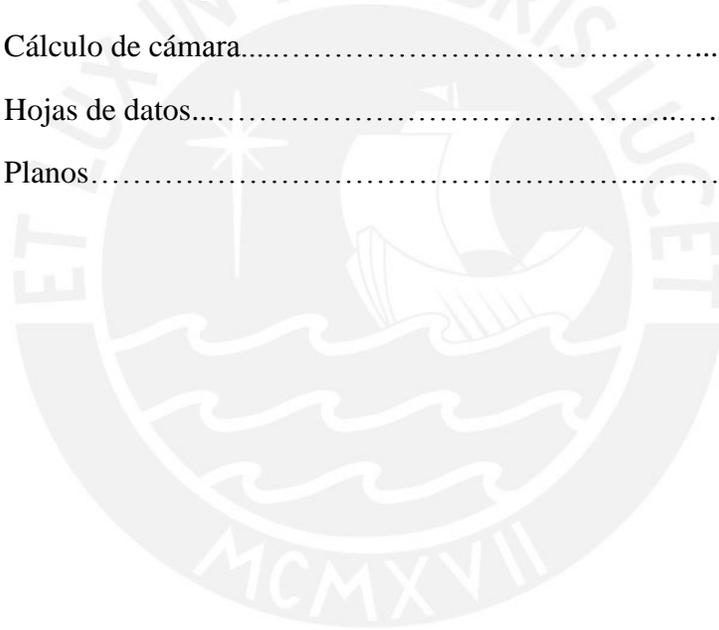
  


## INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
INDICE DE CONTENIDO .....	i
INDICE DE TABLAS .....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS .....	v
INTRODUCCION .....	1
PRESENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA .....	2
1.1    Objetivo general .....	3
1.2    Objetivos específicos.....	4
ESTADO DEL ARTE .....	5
2.1    Plataformas robóticas.....	5
2.1.1    Plataformas comerciales .....	5
Tabla 2.1 Datos técnicos Multirotor G4 [8] .....	6
2.1.2    Proyectos de investigación .....	7
2.2    Cámaras .....	9
2.2.1    Cámaras infrarrojas.....	9
2.2.2    Cámaras ultravioletas .....	11
2.2.3    Cámaras de profundidad.....	13
REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO .....	16
3.1    Requerimientos del sistema mecatrónico.....	16
3.1.3    Requerimientos.....	16
DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO .....	18
4.1    Sistema integrado.....	18
4.2    Diagrama de componentes .....	20
4.3    Componentes electrónicos .....	22
4.3.1    Cámara de profundidad .....	22
4.3.2    Cámara termográfica .....	23
4.3.3    Fuente de alimentación.....	24
4.3.4    Sensor de voltaje y corriente .....	25

4.3.5	Regulador de voltaje.....	27
4.3.6	Controlador de vuelo .....	27
4.3.7	Kit de desarrollo de software.....	29
4.3.8	Controlador de velocidad electrónico y circuito de potencia .....	30
4.3.9	Localización del sistema mecatrónico.....	31
4.3.10	Motores.....	32
4.4	Componentes mecánicos.....	35
4.4.1	Hélices .....	36
4.4.2	Acople brazo-motor .....	37
4.4.3	Acople brazo-cuerpo.....	38
4.4.4	Brazo.....	39
4.4.5	Montura antivibración para cámara.....	40
4.4.6	Montura antivibración para controlador de vuelo .....	41
4.4.7	Pierna acoplada.....	42
4.5	Diagrama de flujo de control .....	43
4.5.1	Principal.....	43
4.5.2	Leer parámetros de entrada.....	44
4.5.3	Volar a punto de inicio .....	46
4.5.4	Configuración inicial del vuelo .....	47
4.5.5	Seguir líneas eléctricas .....	48
4.5.6	Inspeccionar líneas eléctricas .....	49
4.5.7	Volar a punto de destino.....	53
4.5.8	Enviar datos .....	54
4.5.9	Inspección de batería .....	55
4.5.10	Capturar fallo.....	56
4.5.11	Reconocimiento inicial de líneas.....	56
4.5.12	Inspección de cámara termográfica .....	58
4.5.13	Inspección de cámara de profundidad .....	59
COSTOS DEL SISTEMA.....		61
5.1	Componentes electrónicos .....	61

5.2	Componentes mecánicos.....	62
5.3	Ingeniería .....	64
5.4	Costos Generales.....	64
CONCLUSIONES.....		65
BIBLIOGRAFIA .....		66
ANEXOS.....		1
Anexo 1: Concepto de solución.....		1
Anexo 2: Cálculo de distancia de recorrido de líneas.....		11
Anexo 3: Cálculos mecánicos.....		21
Anexo 4: Cálculo de campo electromagnético.....		35
Anexo 5: Cálculo de cámara.....		36
Anexo 6: Hojas de datos.....		41
Anexo 7: Planos.....		75



## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Datos técnicos Multirotor G4 [8] .....	6
Tabla 2.2 Datos técnicos Nighthawk [10] .....	7
Tabla 2.3 Datos técnicos Linescout [11] .....	8
Tabla 2.4 Datos técnicos Helicóptero Autónomo [12] .....	9
Tabla 2.5 Datos técnicos Quark 336 [13] .....	10
Tabla 2.6 Datos técnicos Optris PI 640 [14] .....	10
Tabla 2.7 Datos técnicos DayCor ROMpact [15] .....	12
Tabla 2.8 Datos técnicos DayCor Swift [17] .....	13
Tabla 2.9 Datos técnicos ZED [18] .....	14
Tabla 2.10 Datos técnicos Orbbec Astra Pro [20] .....	15
Tabla 4.1 Datos técnicos ZED [18] .....	22
Tabla 4.2 Datos técnicos Quark 336 .....	23
Tabla 4.3 Datos técnicos Batería Pulse Lipo [25] .....	25
Tabla 4.4 Datos técnicos sensor de voltaje y corriente Attopilot 180A [26] .....	26
Tabla 4.5 Datos técnicos reductor de voltaje UBEC DUO 12V/5V [28] .....	27
Tabla 4.6 Datos técnicos autopiloto Pixhawk [29] .....	28
Tabla 4.7 Datos técnicos Kit de desarrollo Jetson TX1 [30, 31] .....	30
Tabla 4.8 Datos técnicos ESC DYS de 40A [32] .....	31
Tabla 4.9 Datos técnicos de GPS 3dr uBlox con kit de compás [33, 34] .....	32
Tabla 4.10 Datos técnicos de motor DC sin escobillas MN5208 [35] .....	33
Tabla 4.11 Datos técnicos de Hélice Tiger Motor 16x5.4 [38] .....	37
Tabla 4.12 Acciones sugeridas basadas en diferencias de temperaturas [43] .....	52
Tabla 5.13 Presupuesto de componentes electrónicos. Fuente: Elaboración Propia. ....	61
Tabla 5.14 Presupuesto de componentes mecánicos. Fuente: Elaboración Propia. ....	62
Tabla 5.15 Presupuesto ingeniería. Fuente: Elaboración Propia. ....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	: Amperios
CAN	: Red de área de controlador
cm	: centímetro
CMOS	: Semiconductor complementario de óxido metálico
CPU	: Unidad de procesamiento central
dB	: decibelio
DC	: Corriente continua
EMI	: Interferencia electromagnética
ESC	: Controlador de velocidad electrónico
GPS	: Sistema de posicionamiento global
GPU	: Unidad de procesamiento gráfico
h	: hora
HDMI	: Interfaz multimedia de alta definición
Hz	: hertz
I2C	: Circuito inter-integrado
IMU	: Unidad de medición inercial
kB	: kilobyte
km	: kilómetro
kV	: kilovoltio
LiPo	: Litio-polímero
LVDS	: Señal diferencial de bajo voltaje
m	: metro
mA	: miliamperios
mAh	: miliamperios-hora
MHz	: megahertz
min	: minuto
mm	: milímetro
mV	: milivoltio
m $\Omega$	: miliohmios
N	: newton
NETA	: Asociación internacional de pruebas eléctricas
nm	: nanómetro
NTSC	: Comité Nacional de Televisión Estándar
PAL	: Línea Alternativa en Fase
pC	: picocoulomb
PID	: Control proporcional, integral y derivativo
PWM	: Modulación por ancho de pulsos
RAM	: Memoria de acceso aleatorio
RF	: Radiofrecuencia
RF	: Radiofrecuencia
RIV	: Voltaje de radio interferencia
s	: segundo
SD	: Digitalmente segura (tarjeta de memoria)
SPI	: Interfaz de periféricos serie

TTL	: Lógica transistor a transistor
$\mu\text{m}$	: micrómetro
UART	: Transmisor-receptor asíncrono universal
UAV	: Unmanned Aerial Vehicle (vehículo aéreo no tripulado)
USB	: Bus estándar universal
UV	: Ultravioleta
V	: voltio
VDC	: Voltios de corriente continua
VGA	: Adaptador gráfico de video



## INTRODUCCION

El presente trabajo muestra el diseño de un hexacóptero autónomo capaz de realizar el mantenimiento predictivo en líneas de media alta tensión, desde el estado del arte hasta la estimación del costo para llevar a cabo el proyecto. A continuación se describirá lo que se desarrollará en cada uno de los capítulos en que se le ha dividido.

En el capítulo 1 se presentará la problemática que existe actualmente, detallando las deficiencias actuales en el Perú con el sistema de mantenimiento predictivo de líneas eléctricas, lo cual servirá de justificación para el desarrollo del presente trabajo, que buscará resolverlas.

En el capítulo 2 se presentará el estado del arte del presente trabajo, este estado del arte incluye plataformas comerciales, proyectos de investigación y una lista de los posibles elementos que se usarán en este proyecto. Asimismo, se realiza una comparativa de los sistemas que permiten actualmente realizar el mantenimiento predictivo mostrando sus características más relevantes.

En el capítulo 3 se detallarán los objetivos y requerimientos de este sistema. Como objetivo general se buscará resolver la problemática expuesta en el capítulo uno, lograr un mantenimiento predictivo más efectivo tomando en cuenta la cantidad de líneas inspeccionadas por día. Asimismo, los requerimientos se presentarán de tal manera que el sistema pueda cumplir con su objetivo.

En el capítulo 4 se presentarán y describirán el concepto de solución óptimo, el diagrama de funcionamiento del sistema, los componentes electrónicos y los componentes mecánicos que formarán parte de la solución planteada. A su vez se presentarán y explicarán los diagramas de flujo de control del sistema, con los cuáles se describirá la lógica de funcionamiento del sistema.

En el capítulo 5 se presentará el costo total de la solución planteada, para lo cual se mostrará una lista con los componentes por dominio que conformarán el sistema con su respectivo valor de adquisición, además se añadirá el costo de ingeniería; estimando el tiempo a trabajar en el proyecto y el costo por mes.

En el capítulo 6 se presentarán las conclusiones del desarrollo del sistema propuesto y se justificará el cumplimiento o incumplimiento de los requerimientos presentados de acuerdo a los datos obtenidos del desarrollo del trabajo realizado.

## PRESENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

En el Perú, el 91.2% de la población tiene cobertura eléctrica [1]. Para lograr esta cobertura, la energía eléctrica pasa por tres etapas: generación, transmisión y distribución. La generación de energía eléctrica en nuestro país se obtiene de diversas fuentes energéticas como la hidráulica (49%), térmica (50%), solar (0.4%) y eólica (0.5%) [2]. Luego, la energía eléctrica es transportada en tensiones elevadas mayores a 30kV a través de líneas de transmisión. Las longitudes de estas líneas en el Perú suman un total de 21 589 kilómetros (km), siendo 98.7% parte del sistema eléctrico interconectado nacional y 1.3% corresponde a sistemas aislados [3]. La energía eléctrica se transporta a subestaciones en donde se reduce la tensión a voltajes en el rango de 3 kilovoltios (kV) y 30kV para distribuirse a través de líneas de distribución. Finalmente se reduce nuevamente el voltaje en subestaciones a 150-220 voltios (V), lo cual llega a industrias u hogares.

Para que el usuario final tenga un suministro de calidad, la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos [4], toma en cuenta diversos factores tales como la calidad del producto (tensión, frecuencia, perturbaciones), el trato comercial (trato del cliente, medio de atención, precisión de medida de la energía), el alumbrado (deficiencias del alumbrado) y el suministro (interrupciones). Este último factor de calidad tiene dos indicadores: número total de interrupciones por cliente por semestre y duración total ponderada de interrupciones por cliente.

Las interrupciones pueden ocurrir por diferentes causas; algunas de estas son muy difíciles de evitar, como las causadas por fenómenos naturales tales como caídas de rayos en las líneas de transmisión, vientos fuertes, gran cantidad de nieve depositada en las líneas, entre otras. No obstante, sí se pueden evitar las interrupciones de suministro cuando estas son causadas por fallos en los equipos tales como aisladores, conexiones, interruptores, entre otros.

Es así que para brindar un suministro de calidad, las empresas buscan evitar este último tipo de interrupciones. Una de las formas de lograr esto es mediante el mantenimiento predictivo en líneas de transmisión y distribución. Este tipo de mantenimiento se puede llevar a cabo con cámaras termográficas o de efecto corona. Las cámaras termográficas permiten visualizar patrones de temperatura. En instalaciones y sistemas eléctricos esta cámara detecta problemas como oxidación de interruptores de alta tensión, conexiones recalentadas, conexiones mal aseguradas y defectos de aislamiento [5] en una fase temprana cuando muestra patrones fuera de lo normal (según las referencias de la Asociación internacional de pruebas eléctricas, NETA por sus siglas en inglés, cuando entre elementos similares en las mismas condiciones de trabajo las diferencias de temperatura son mayores a 15°C). Las cámaras de efecto corona permiten visualizar emisiones ultravioleta (UV) que se producen ante una descarga corona; este es un fenómeno que ocurre en líneas de alta tensión, se origina

cuando la fuerza del campo eléctrico es tan fuerte que ioniza el aire alrededor del conductor, el aire ionizado genera gases corrosivos que dañan los equipos y líneas. En líneas de transmisión y distribución esta cámara detecta problemas como aisladores dañados, hebras rotas, mal diseño de equipos eléctricos, daños estructurales, contaminación en la línea, entre otros [6], en una fase inicial de desarrollo del problema cuando esta muestra una cantidad apreciable de fotones generados por el efecto corona.

En general, la etapa de generación y la etapa de distribución tienen una amplia separación geográfica, por lo cual las líneas de transmisión recorren grandes distancias pasando por diferentes tipos de lugares. A algunos de estos se puede llegar sin mayores problemas, sin embargo también hay áreas inaccesibles. Es así que, para que los técnicos puedan llegar a estos lugares se debe hacer uso de vehículos todo terreno o helicópteros.

Los principales problemas con este mantenimiento son el elevado costo de utilizar los medios de transporte para llegar a las áreas inaccesibles y los riesgos para los técnicos en la inspección. En la actualidad se ha comenzado a usar plataformas robóticas como complemento o sustitución de estos medios, pero aún es menester que el operario se encuentre a una distancia próxima del vehículo aéreo no tripulado (UAV) para poder controlarlo y analizar lo captado por este a través de una pantalla remota. Así, la eficiencia de este mantenimiento, considerándola como la relación entre la distancia recorrida por el robot y su tiempo de operación, depende de la habilidad del operario para manejar esta plataforma mientras analiza lo que observa, donde él mismo realiza ambas acciones; o en otros casos, depende de la habilidad y sincronía de un operario que maneje el sistema robótico, mientras otro realiza la inspección con lo que muestra el sistema. A pequeña escala, la eficiencia de este tipo de mantenimiento con robots puede no ser significativa, pero considerando que las líneas de transmisión en el Perú suman en total 21 589 km esta debe ser tomada en cuenta.

Por la problemática expuesta, se planteó desarrollar un sistema que pueda realizar un mantenimiento predictivo más seguro para el operario, más rápido en términos de longitud de líneas inspeccionadas por vuelo, y menos costoso en comparación con el mantenimiento predictivo tradicional mediante el uso de un hexacóptero que inspeccione las líneas eléctricas de manera autónoma con una cámara termográfica.

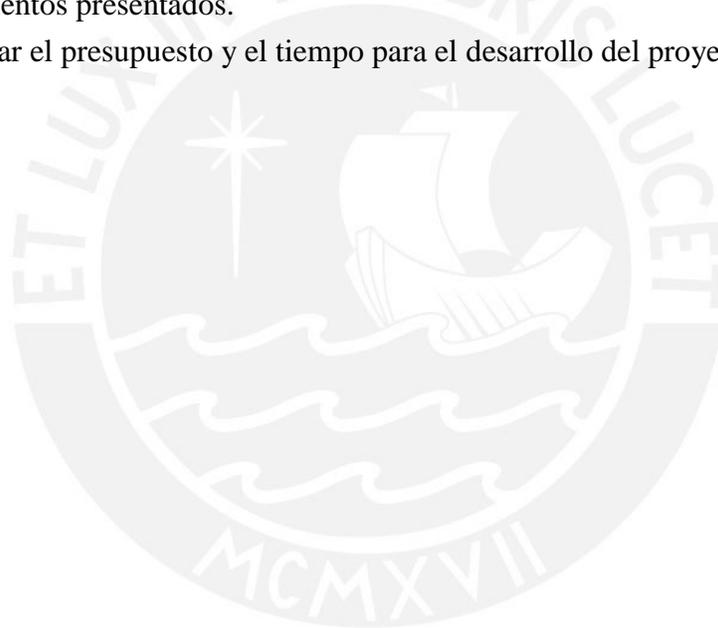
### 1.1 Objetivo general

El objetivo del presente trabajo es diseñar un hexacóptero capaz de realizar el mantenimiento predictivo en líneas de transmisión eléctrica de manera autónoma. Este sistema presentará una alternativa más económica, segura y rápida a los métodos utilizados actualmente; debido a que no se precisarán del uso de vehículos todo terreno o helicópteros para acceder a terrenos de difícil acceso, operarios que viajen en estos vehículos por terrenos peligrosos y que operen

el sistema, además, que el procesamiento de la información lo realizará una computadora, lo cual acelerará el proceso de recorrido de líneas e identificación de las potenciales fallas.

### 1.2 Objetivos específicos

- Investigar los métodos actuales que se utilizan para realizar el mantenimiento predictivo en líneas de transmisión.
- Definir los requerimientos del sistema.
- Crear tres conceptos de solución acordes a los requerimientos del sistema y elegir, en base a una evaluación técnica y económica, el concepto óptimo a desarrollar.
- Seleccionar o diseñar los componentes mecánicos y electrónicos que serán parte del sistema.
- Realizar cálculos y simulaciones mecánicas y aerodinámicas del sistema diseño.
- Diseñar el algoritmo de funcionamiento del sistema que le permita cumplir los requerimientos presentados.
- Determinar el presupuesto y el tiempo para el desarrollo del proyecto.



## ESTADO DEL ARTE

Debido al avance de la electrónica y la mecatrónica, las empresas dedicadas al mantenimiento predictivo en líneas de transmisión y/o distribución han optado por desarrollar nuevos métodos o usar tecnologías que les permita realizar este de una forma más rápida, menos costosa y menos riesgosa para los técnicos. En el presente trabajo, se buscará encontrar en los métodos o tecnologías usados actualmente, soluciones que nos ayuden en el propósito planteado. Es así, que se analizarán tanto sistemas robóticos en conjunto como los componentes que los forman.

### 2.1 Plataformas robóticas

A continuación se analizarán algunos de los sistemas mecatrónicos más importantes e innovadores.

#### 2.1.1 Plataformas comerciales

##### 2.1.1.1 Multirotor G4

Este hexacóptero comercial está adaptado para realizar inspecciones térmicas gracias a la incorporación de una cámara termográfica. Se requiere un operario para poder controlarlo de forma remota, una pantalla remota muestra lo visualizado por la cámara infrarroja. Tal como muestra la información en la tabla 2.1, tiene un tiempo de vuelo limitado (20 minutos) y una máxima velocidad media (30 km/h). Este multirotor además permite controlar la cámara con lo que se puede mover esta en la dirección que se requiera.



Fig. 2.1 Multirotor G4 drone con cámara de imagen térmica [7]

Tabla 2.1 Datos técnicos Multirrotor G4 [8]

Datos técnicos	
Suspensión de cámara	Gimbal sin escobillas
Modos de vuelo	Mantener posición, Regresar a casa
Máxima velocidad	30 km/h
Máximo tiempo de vuelo (ideal)	20 min
Máximo peso de despegue (ideal)	5000 g
Tamaño del paquete	88x45x22 cm <sup>3</sup>
Carga útil (Incluido batería y propulsores)	2300 g
Conectores de servo	6
Estable a viento de hasta	10 m/s
Cámara termográfica	optris PI

#### 2.1.1.2 Nighthawk Thermal P2

Este cuadricóptero comercial permite realizar el mantenimiento predictivo en líneas eléctricas debido a que porta una cámara termográfica. Se requiere de al menos un operario para que lo controle a través de un control remoto. Tiene una cámara visual además de la infrarroja, lo captado por las dos cámaras se muestra en dos pantallas remotas; esto le permite a un operario tener una mejor experiencia de vuelo, a la vez que el mismo u otro realiza la inspección con ayuda del UAV. Tal como lo muestra la tabla 2.2 este sistema tiene un tiempo de vuelo limitado (25 minutos) y una velocidad máxima alta (54 km/h), esto debido a su peso reducido (1000g).



Fig. 2.2 Nighthawk Thermal P2 Aerial Kit [9]

Tabla 2.2 Datos técnicos Nighthawk [10]

<b>Datos técnicos</b>	
Suspensión de cámara	Gimbal de 3 grados
Modos de vuelo	Auto Retorno-a-casa, Aterrizaje
Máxima velocidad	54 km/h
Máximo tiempo de vuelo (ideal)	25 min
Máximo peso de despegue (ideal)	1300 g
Tamaño del paquete	51x26x36 cm
Carga útil (Incluido batería y propulsores)	1000 g
Conectores de servo	4
Cámara termográfica	Quark 2

## 2.1.2 Proyectos de investigación

### 2.1.2.1 Robot LineScout

Este robot puede realizar tanto mantenimiento predictivo como correctivo. Para lograr esto el LineScout está equipado con control remoto, cámara visual, cámara térmica, pantalla remota, ruedas y brazo robótico. Este robot se monta en líneas vivas de alta tensión, se sostiene y avanza a través de sus ruedas, sus cámaras visual e infrarroja graban lo captado para realizar un post-procesamiento a la vez que envían sus imágenes a pantallas remotas que permiten a los operarios manejar el robot y analizar fallos potenciales en los equipos. Su brazo robótico de tres grados de libertad le permite realizar diversas tareas tales como apretar y aflojar tornillos, medir con ohmímetro para verificar la condición de los empalmes y reparar temporalmente hilos del conductor roto.



Fig. 2.3 Robot Linescout [11]

Tabla 2.3 Datos técnicos Linescout [11]

Datos técnicos	
Peso	100 kg
Longitud x Altura	1.37m x 0.75m
Fuerza de tracción	500 N
Velocidad lineal	1.0 m/s
Tiempo de batería	5.0 h
Alcance de señal de comunicación	5.0 km
Robustez EMI	735 kV, 1000 A
Cámara	Se pueden incluir 4 cámaras, las cuales pueden ser visuales y térmicas

#### 2.1.2.2 Helicóptero Autónomo para Inspecciones Aéreas de Líneas Eléctricas

Este helicóptero ha sido diseñado para realizar mantenimiento predictivo en líneas de alta tensión. A pesar de que un operario debe manejarlo remotamente para realizar la inspección, puede volar autónomamente cuando este pierda el control del robot debido a los sensores que posee. Tiene la capacidad de cargar una cámara que inspeccione las líneas eléctricas, además presenta el mayor tiempo de vuelo con respecto a los robots vistos anteriormente debido a que utiliza hidrocarburos como fuente de energía (55 minutos).



Fig. 2.4 Plataforma de Helicóptero Autónomo CSIRO en vuelo [12]

Tabla 2.4 Datos técnicos Helicóptero Autónomo [12]

<b>Datos técnicos</b>	
Modos de vuelo	Vuelo autónomo cuando se pierde línea visual
Máxima velocidad	64.8 km/h
Máximo tiempo de vuelo (ideal)	55 minutos
Max. peso de despegue (ideal)	12300 g
Carga útil (Incluido gasolina, sensores y computadoras de vuelo)	4600 g
Cámara	Se puede incluir una cámara termográfica

## 2.2 Cámaras

Las cámaras son elementos fundamentales en sistemas autómatas, pues le dan al robot información de su entorno, que se procesará para finalmente realizar las acciones que se requieran. Los avances en la electrónica han permitido disminuir el tamaño y peso de estas cámaras facilitándoles su integración en robots aéreos. A continuación se mostrará el estado del arte de los tipos de cámara que se usarán en este trabajo.

### 2.2.1 Cámaras infrarrojas

#### 2.2.1.1 Flir Quark 2

Esta cámara termográfica es una de las más compactas y livianas de su tipo (18-23g). Su dimensión reducida permite ahorrar espacio y su bajo peso posibilita alargar la batería del robot que la lleve (22×22×12 mm), pues se disminuye la energía necesaria para desplazar su masa. A pesar de tener una tasa de cuadros por segundo regular (60Hz), presenta una resolución aceptable (336x256 pixeles).



Fig. 2.5 Flir Quark 2 (izquierda) imagen térmica de la cámara (derecha) [13]

Tabla 2.5 Datos técnicos Quark 336 [13]

Datos técnicos	
Resolución óptica	336 × 256 píxeles
Banda espectral	7.5 - 13.5 μm
Cuadros por segundo	30/60 Hz
Fuente de energía	5 3.3 +/- 0.1 VDC
Tamaño	22 × 22 x 12 mm (menos lentes)
Peso	18.3g – 23.0g (dependiendo del lente)
Interfaz de montaje	4 M1.6 x 0.35 en parte posterior de marco de cámara

### 2.2.1.2 Optris PI 640

Esta cámara termográfica permite medir la temperatura en tiempo real a una alta tasa de cuadros por segundo (125Hz); lo cual aumenta la velocidad de movimiento con que se puede grabar sin que las imágenes capturadas se vean distorsionadas por el desenfoque de movimiento. Su relativamente elevado peso (320g) acortará el tiempo de vida de la batería del robot que lo desplace.

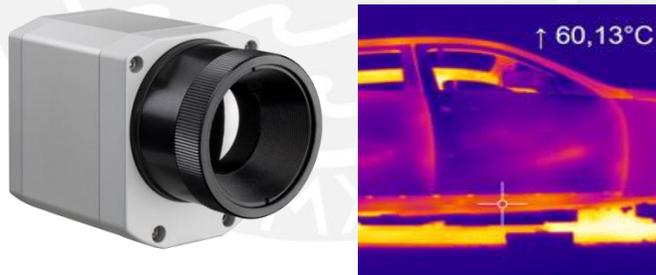


Fig. 2.6 Optris PI 640 (izquierda) imagen térmica de la cámara (derecha) [14]

Tabla 2.6 Datos técnicos Optris PI 640 [14]

Datos técnicos	
Resolución óptica	640 × 480 píxeles
Banda espectral	7.5 - 13.5 μm
Cuadros por segundo	32 Hz / 125 Hz en modo subframe (640x120 píxeles)
Fuente de energía	vía USB
Tamaño	46 × 56 x 90 mm / IP 67 (NEMA 4)
Peso	320 g (incl. lentes)
Interfaz de montaje	Montura trípode 1/4 - 20 UNC

## 2.2.2 Cámaras ultravioletas

### 2.2.2.1 DayCor® ROMpact

Esta cámara ultravioleta permite visualizar los fotones producidos por el efecto corona en tiempo real. Sus características le permiten realizar inspecciones a altas velocidades (sensibilidad, detección de descarga mínima, detección de UV mínima y campo de visión), sin embargo el peso de esta cámara (1200g) limita considerablemente el tiempo de vida de la batería del robot que desplace su masa.



Fig. 2.7 DayCor® ROMpact (izquierda) [15] imagen ultravioleta de cámaras DayCor [16] (derecha)

Tabla 2.7 Datos técnicos DayCor ROMpact [15]

Datos técnicos	
Banda espectral	240 - 280 nm
Detección de descarga mínima	1 pC @ 10 metros
Sensibilidad UV mínima	2.2 x 10 <sup>-18</sup> watt/cm <sup>2</sup>
Campo de visión	8° x 6°
Comunicación	RS-232, velocidad de transmisión: 38.4 Kb/s
Tamaño	247 x 125 x 73 mm
Peso	1200 g
Consumo de energía nominal	7.5÷10 VDC, 14 Watts

#### 2.2.2.2 DayCor® Swift

Esta cámara ultravioleta permite visualizar los fotones producidos por el efecto corona en tiempo real. Sus características le permiten realizar inspecciones a velocidades medias (sensibilidad, detección de descarga mínima, detección de UV mínima y campo de visión), a pesar de esto el peso de esta cámara es el más elevado (1400g) de entre las vistas anteriormente; lo cual reducirá considerablemente el tiempo de vida de la batería del robot que desplace su masa.



Fig. 2.8 DayCor® Swift (izquierda) [17] imagen ultravioleta de cámaras DayCor [16] (derecha)

Tabla 2.8 Datos técnicos DayCor Swift [17]

Datos técnicos	
Banda espectral	240 - 280 nm
Detección de descarga mínima	1pC @ 10 metros
Sensibilidad UV mínima	$3 \times 10^{-18}$ watt/cm <sup>2</sup>
Campo de visión	6.4° x 4.8°
Comunicación	RS-232, 38.4 Kb/s
Tamaño	247 × 125 x 73 mm
Peso	1400 g
Consumo de energía nominal	6.5÷10 VDC, 14 Watts

### 2.2.3 Cámaras de profundidad

#### 2.2.3.1 ZED™

Esta cámara de profundidad permite medir la distancia a la que se encuentran objetos cercanos a la cámara. Su amplio rango de profundidad, de 20 metros (m), le permite detectar objetos a una mayor distancia, su alta tasa de cuadros por segundo (100Hz) permite realizar inspecciones a altas velocidades, su bajo peso (159g) garantiza un mayor tiempo de vida de la batería y su alta resolución (1280x480 píxeles) permite imágenes de alta calidad. Se comunica por bus estándar universal (USB) 3.0, lo cual permite una transferencia de datos hasta 10 veces más rápida que su antecesor el USB 2.0 (4.8 gigabits por segundo vs 480 megabits). Debido a su velocidad de cuadros por segundo (100 Hz) y su resolución óptica (1280x480 píxeles), esta cámara requiere utilizar una unidad de procesamiento gráfico (GPU) además de la unidad de procesamiento central (CPU).



Fig. 2.9 ZED™ (izquierda) [18] imagen mostrada por visor de profundidad [19]

Tabla 2.9 Datos técnicos ZED [18]

Datos técnicos	
Cuadros por segundo	100 Hz, modo adaptador gráfico de videos (VGA)
Resolución óptica	1344 x 376 pixeles, modo VGA
Rango de profundidad	0.7 - 20 m
Formato de profundidad	32-bits
Comunicación	USB 3.0
Tamaño	175 × 30 x 33 mm
Peso	159 g
Fuente de energía	USB, 5V 380mA

### 2.2.3.2 Orbbec Astra Pro

Esta cámara de profundidad permite medir la distancia a la que se encuentran objetos cercanos a la cámara. Su rango de profundidad le permite detectar objetos a una mediana distancia (8m) y su tasa de cuadros por segundo (30Hz) le permite realizar inspecciones a velocidades medias. Tiene un peso relativamente elevado (300g) que disminuirá el tiempo de vida de la batería del robot que desplace su masa.

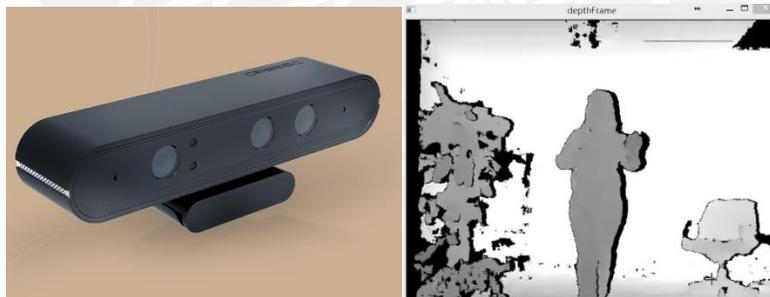


Fig. 2.10 Orbbec Astra Pro (izquierda) [20] imagen mostrada por visor de profundidad (derecha) [21]

Tabla 2.10 Datos técnicos Orbbec Astra Pro [20]

<b>Datos técnicos</b>	
Cuadros por segundo	30 Hz, modo VGA
Resolución óptica	640 x 480 pixeles, modo VGA
Rango de profundidad	0.4 - 8 m
Formato de profundidad	16-bits
Comunicación	USB 2.0
Tamaño	160 × 30 x 40 mm
Peso	300 g
Fuente de energía	USB 2.0



## REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO

### 3.1 Requerimientos del sistema mecatrónico

#### 3.1.3 Requerimientos

El requerimiento principal es que el sistema permita inspeccionar las líneas eléctricas con una cámara termográfica y detectar cuando un elemento está a punto de fallar, mientras realiza el vuelo siguiendo las líneas eléctricas.

##### 3.1.3.1 Requerimientos Mecánicos

- El UAV debe tener una capacidad de carga útil de elevación tal que pueda levantar todos los sensores, actuadores, elementos de control y estructura mecánica, que le permitan realizar el mantenimiento predictivo.
- El UAV deberá tener un diámetro máximo de 1.2 metros.
- El UAV debe minimizar en su estructura la composición de materiales conductivos.
- El UAV debe presentar una geometría que ofrezca una resistencia ligera al viento; como referencia, cuando el UAV vuele con una velocidad relativa del viento en contra al vuelo de 20.33m/s, este le ofrezca como máximo una resistencia de 19.8N.
- El UAV deberá recorrer por lo menos 10 km de líneas eléctricas a nivel del mar.
- La estructura debe soportar su propio peso y además debe soportar las fuerzas mecánicas producidas por el despegue, vuelo y aterrizaje.
- La estructura debe contener y restringir el movimiento de los componentes electrónicos.
- La velocidad de vuelo máxima no debe exceder los 55km/h.

##### 3.1.3.2 Requerimientos Electrónicos y de Software

- El robot debe tener un sistema que le permita soportar las interferencias electromagnéticas provenientes de las líneas de transmisión y distribución a una distancia menor que la servidumbre (distancia libre de construcción) de la línea inspeccionada.
- El UAV debe procesar las imágenes captadas por la cámara termográfica con tal de identificar aquellas en donde se muestren patrones específicos que indiquen fallos potenciales.
- Otorgar al sistema la capacidad de almacenar y transmitir los datos esenciales en la inspección de las líneas; tales como coordenadas, fecha, hora, imagen térmica e imagen visual del potencial fallo detectado.

##### 3.1.3.3 Requerimientos de Control

- El sistema debe poder volar de manera autónoma, siguiendo las líneas de transmisión.

- El sistema debe contar con un procesador que le permita realizar todas las funciones requeridas.
- El UAV deberá tener un vuelo estable con vientos de hasta 10 m/s.
- El UAV debe tener un sistema de posicionamiento que le permita ubicarse en donde se requiera
- El UAV debe tener un algoritmo que le permita despegar, aterrizar y seguir las líneas eléctricas.
- El UAV debe tener un algoritmo que le permita detectar los posibles fallos en las líneas eléctricas.



## DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO

### 4.1 Sistema integrado

El sistema presentado, que es el concepto de solución óptimo entre tres propuestas presentadas para resolver la problemática (Véase Anexo 1), consiste en un multicoptero (figura 4.1) compuesto por seis brazos de fibra de carbono en los que irán acoplados en cada uno un conjunto de motor y hélices de carbono de bajo peso que le permitirán realizar un vuelo ligero y por lo tanto eficiente. El control de vuelo lo realizará un autopiloto y el procesamiento de las imágenes un kit de desarrollo de software con la capacidad de procesar las imágenes brindadas tanto por la cámara de profundidad como la térmica; de esta manera, el sistema será capaz de tener un vuelo autónomo y de reconocer las potenciales fallas en los elementos de las líneas eléctricas.

El sistema comenzará la inspección cuando a través de una conexión ethernet entre el sistema embebido y la computadora, esta última le indique que se encienda. Luego de encendida la tarjeta, se le dará los parámetros del vuelo tales como hora de inicio de inspección, coordenadas del inicio del vuelo, distancia que deberá recorrer, coordenadas del lugar de destino y coordenadas de puntos especiales (final de las líneas de transmisión, separación de las líneas). Una vez configurada la tarjeta con los parámetros de vuelo, el siguiente paso es el vuelo del hexacóptero.

El UAV vuela a 10 metros de las líneas eléctricas (más específicamente de la fase del medio de las líneas de tensión, llamada fase S) y con un ángulo de elevación de  $55^\circ$  con respecto a la fase S, tal como se muestra en la figura 4.2. Los diez metros se deben a que se desea que el UAV se encuentre a una distancia tal que el campo magnético de las líneas no afecte sus circuitos (véase anexo 4). Los  $55^\circ$  se deben a que la cámara de profundidad tiene un campo de visión de  $110^\circ$ , entonces con esta inclinación se evita que los brazos del hexacóptero interfieran con su visión (véase figura 4.3 izquierda).

El hexacóptero seguirá las líneas eléctricas a 30km/h con ayuda de la cámara de profundidad, ya que a esta velocidad las cámaras escogidas aún captan imágenes nítidas (véase anexo 5) y también porque a esta velocidad se ha calculado que se pueden recorrer por lo menos 10km de líneas (ver anexo 2). La cámara de profundidad no se ubicará mirando directamente a las líneas, sino que las verá con un ángulo de inclinación de  $60^\circ$  hacia adelante (véase figura 4.3 derecha), de esta forma se puede utilizar esta para saber el camino de las líneas a una mayor distancia, además de poder evitar obstáculos en el camino.

La inspección en las líneas se realizará con ayuda de la cámara termográfica, la cual estará instalada mirando directamente a las líneas eléctricas y con un ángulo de depresión de  $50^\circ$  ya que con este ángulo se aprovecha mejor el campo de visión de la cámara para cubrir las 3 fases de las líneas (ver anexo 5 para explicación más detallada). Cada vez que el sistema detecte una temperatura fuera del rango normal (ver tabla 22) en la línea se guardarán las

imágenes de las cámaras de profundidad y termográfica, a su vez se guardarán las coordenadas, fecha y hora en que se captó esta anomalía.

Tan pronto el hexacóptero termina de realizar la inspección en las líneas, o el sensor de batería Attopilot indique que la batería LiPo de 22'000mAh no tiene la suficiente energía para que este siga inspeccionando las líneas, el sistema volará a su punto de destino, el cual podrá ser el punto de origen u otro punto. Cuando el UAV llegue a su destino, se le conectará con una computadora vía ethernet y a través de un software se descargará la información en esta última y se generará un reporte de la inspección.



Fig. 4.1 Vista isométrica del sistema integrado. Fuente: elaboración propia.

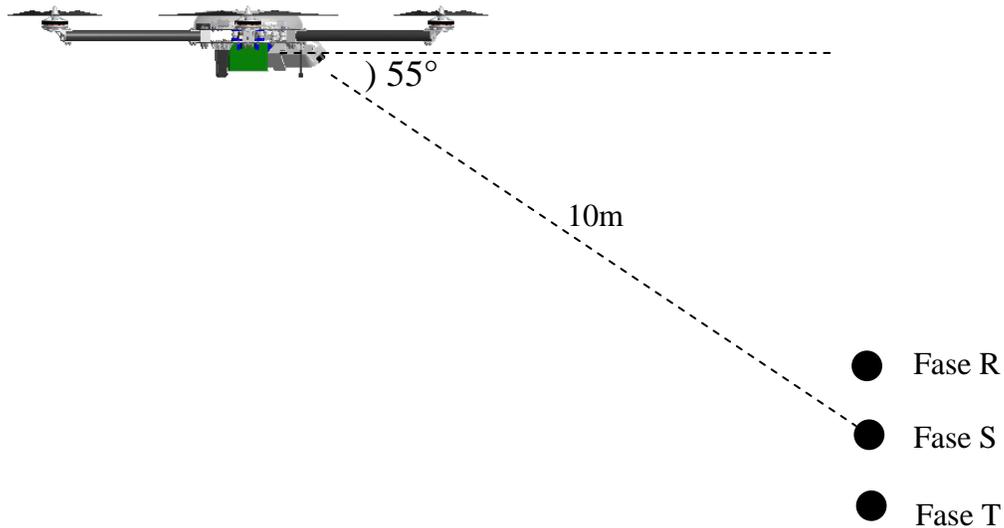


Fig. 4.2 Representación de sistema inspeccionando línea eléctrica. Fuente: elaboración propia.

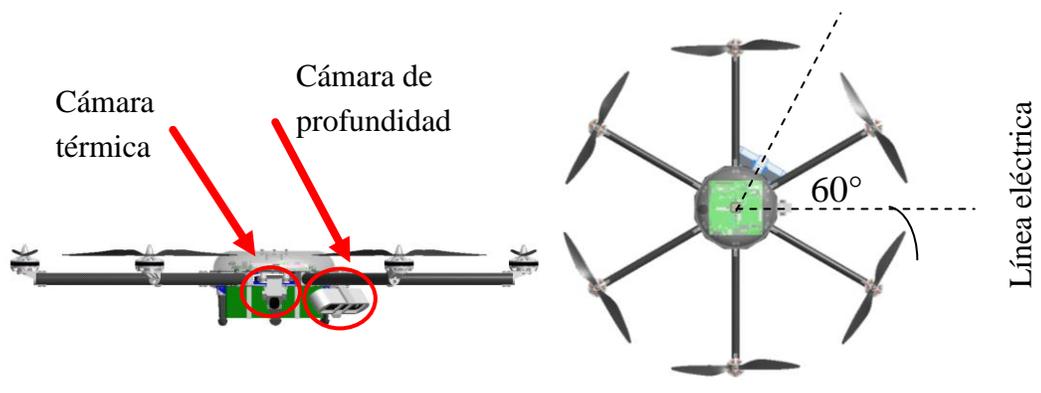


Fig. 4.3 Vista frontal (izquierda) y vista superior (derecha) del sistema integrado inspeccionando línea. Fuente: elaboración propia.

#### 4.2 Diagrama de componentes

En el diagrama presentado (figura 4.4) se muestran las conexiones entre los diversos componentes electrónicos. Como se puede observar la fuente de energía es la batería litio-polímero (LiPo), que irá conectada a un sensor de voltaje y corriente, el cual a su vez le transmitirá la data recogida de la batería al controlador de vuelo. El controlador de vuelo y el kit de desarrollo de software son alimentados por un regulador de voltaje ya que no soportan el voltaje brindado por la batería. Ambas cámaras se comunicarán y alimentarán con el kit de desarrollo de software, que procesará sus imágenes, tanto térmica como de profundidad, y en base a estas inspeccionará las líneas y comunicará al controlador de vuelo que trayectoria seguir. El controlador de vuelo se conecta a la bocina pues está programado para emitir alertas acústicas cuando hay batería baja, no se ha inicializado correctamente, no hay tarjeta SD, entre otras. Este último alimenta y se comunica con un módulo GPS, lo que le permite conocer su ubicación en todo momento, además se comunicará con el controlador electrónico de velocidad (ESC) para controlar la velocidad de los motores.

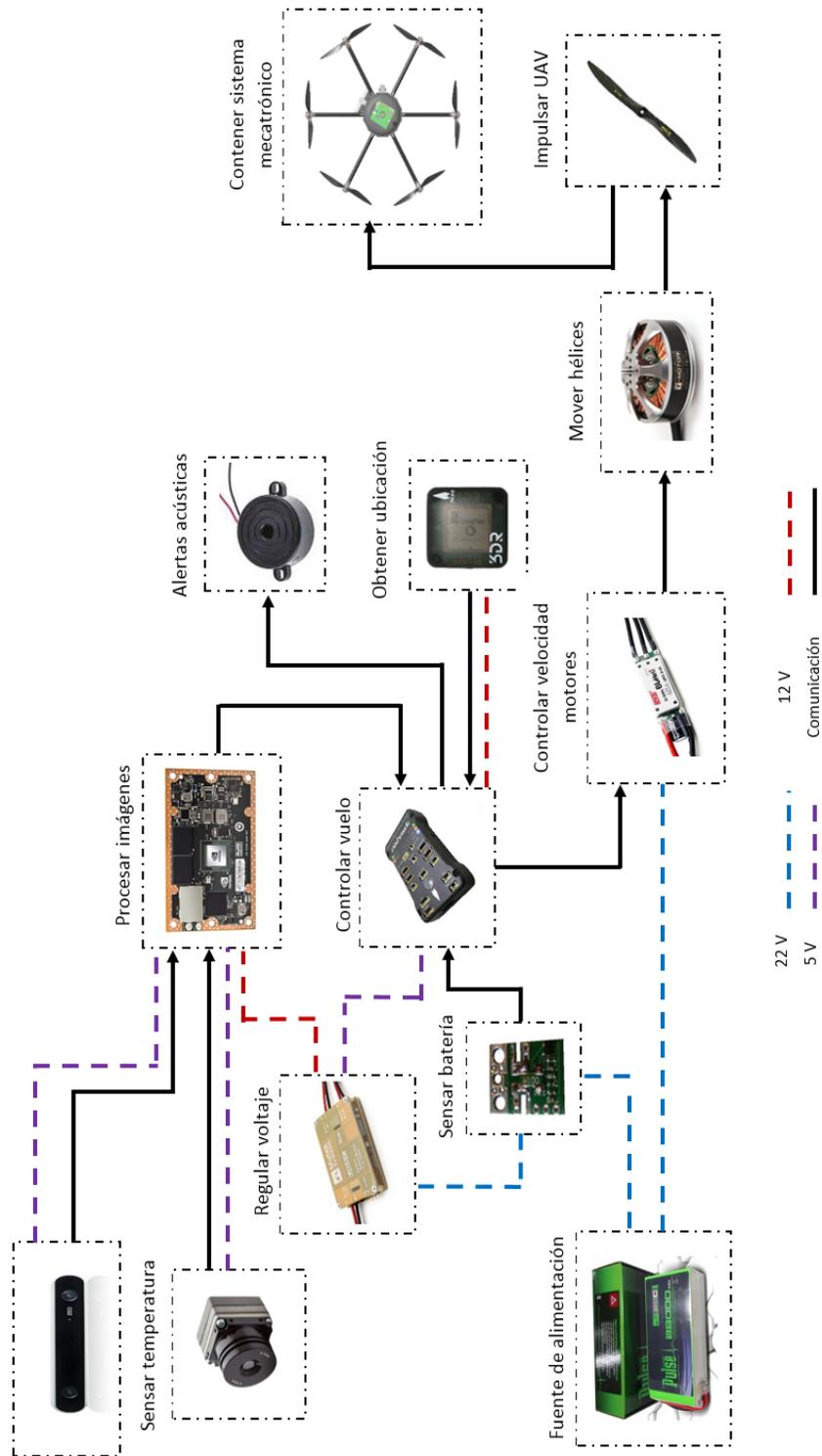


Fig. 4.4 Diagrama de componentes. Fuente: elaboración propia.

A continuación se describirán las características de cada uno de estos y su función específica en el sistema.

### 4.3 Componentes electrónicos

#### 4.3.1 Cámara de profundidad

Esta cámara sensa la profundidad en todo su campo de visión y muestra las profundidades en escala de grises y en píxeles tal como se muestra en la figura 4.5, de esta manera se tiene un completo conocimiento de los objetos que se encuentran delante de la cámara y su distancia a esta. Se escogió esta cámara de profundidad pues brinda el mayor rango de profundidad en el mercado, en este caso de 0.7 a 2m (véase tabla 4.11), con lo que el sistema tendrá mayor tiempo de reaccionar a obstáculos cuando se aparezcan en el camino; además, tiene el mayor número de cuadros por segundo, de 100 Hz (véase tabla 4.11), por ende menor tiempo de obturación, por lo tanto se minimizará el efecto blur por el movimiento del hexacóptero. El sistema mecatrónico usará esta cámara para saber la distancia a la que se encuentran las líneas eléctricas y a su vez seguirlas, además se pueden detectar objetos que se encuentren en el camino del hexacóptero y de esta forma evitarlos (véase la lógica de control en el capítulo 4).



Fig. 4.5 Cámara ZED [18] (izquierda) imagen mostrada por visor de profundidad [19] (derecha)

Tabla 4.11 Datos técnicos ZED [18]

Datos técnicos	
Cuadros por segundo	100 Hz (modo de video VGA)
Resolución óptica	1344 x 376 (modo de video VGA)
Rango de profundidad	0.7 - 20 m
Formato de profundidad	32-bits
Comunicación	USB 3.0
Tamaño	175 × 30 x 33 mm
Peso	159 g
Fuente de energía	USB, 5V 380mA

Otros sensores de profundidad tales como el sensor ultrasónico sólo brindan información acerca de la distancia de los objetos más cercanos, mas no se puede saber la posición de este

objeto o saber las profundidades de su entorno, datos importantes para esta aplicación pues se necesita detectar las tres fases de transmisión y seguir a la del medio, es decir la fase S, además se necesita detectar la posición y el tamaño de objetos que se encuentren en el camino del hexacóptero para así poder evitarlos.

#### 4.3.2 Cámara termográfica

La cámara termográfica capta la radiación emitida por los elementos que se encuentran en su rango focal para luego calcular la temperatura de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann que relaciona la radiación emitida por un objeto con su temperatura, la temperatura del ambiente, su emisividad, y la constante de Stefan. Así, configurando la cámara correctamente se pueden conocer las temperaturas de los componentes a inspeccionar y detectar los que estén a punto de fallar, tal como se observa en la imagen derecha de la figura 4.6. Se escogió esta cámara pues, con sus 23g de peso y 2.2cm de medida máxima es la cámara más liviana y pequeña en el mercado, lo que la hace ideal para nuestro sistema; debido a que un peso bajo significa menor energía para mantener el sistema en el aire y por tanto mayor tiempo de vuelo. Además, sus dimensiones reducidas significan menor resistencia al viento, por tanto menor energía para vencer dicha resistencia.



Fig. 4.6 De izquierda a derecha: cámara quark 2 [13], imagen termográfica de torre de transmisión [22] imagen termográfica de componente a punto de fallar [23]

Tabla 4.12 Datos técnicos Quark 336

Datos técnicos	
Resolución óptica	336 × 256 píxeles
Banda espectral	7.5 - 13.5 μm
Cuadros por segundo	30/60 Hz (NTSC); 25/50 Hz (PAL) ; <9Hz opción de exportación
Fuente de energía	5 3.3 +/- 0.1 VDC
Tamaño	22 × 22 x 12 mm (menos lentes)
Peso	18.3g – 23.0g (dependiendo del lente)

También se usan cámaras de efecto corona para el mantenimiento predictivo en líneas eléctricas, estas cuentan los fotones que se emiten por el efecto corona en los componentes del sistema eléctrico. Se puede detectar el potencial fallo de un componente cuando se capta

una cantidad de fotones emitidos mayor a lo normal, tal como se muestra en la figura 4.7. Aunque este tipo de cámaras también funcionan para realizar el mantenimiento predictivo, son más pesadas que las termográficas, por lo que se prefirió las primeras.

Se escogió el primer tipo de cámaras para realizar el mantenimiento predictivo pues el hardware de estas es más liviano respecto a la segunda opción, y para esta aplicación (aérea) el peso es un factor crítico ya que a mayor peso menor tiempo de vuelo, además las cámaras termográficas también permiten detectar fallos en las líneas, no como las de efecto corona que solo los detectan en los componentes de la torre de transmisión o distribución.



Fig. 4.7 Efecto corona producido en línea de transmisión [24]

#### 4.3.3 Fuente de alimentación

En la elección de baterías para aplicaciones aéreas no tripuladas se tienen en cuenta dos factores fundamentales, uno es la capacidad energética y otro es el peso; a mayor capacidad energética, mayor es el tiempo de vuelo del sistema que la use, sin embargo también será mayor el peso de la batería, por ende mayor el consumo energético del UAV para transportarla y su capacidad para levantar peso.

Uno de los requerimientos del presente trabajo es recorrer 10 km de líneas eléctricas, por tanto el tiempo de vuelo debe ser el necesario para poder recorrer esta distancia, es por esto que se escogió una batería de litio-polímero, ya que estas baterías presentan una alta densidad energética aunque no la mayor, como el caso de las baterías de ion-litio. Además, a diferencia de otras baterías tales como las de ion-lito o níquel-cadmio, son capaces de otorgar gran cantidad de energía al sistema; es decir pueden descargarse a un ratio de hasta 100 veces la cantidad de energía en una batería (Ah), lo cual es vital para poder alimentar los requerimientos de los sistemas UAV que utilizan gran cantidad de corriente, siendo los motores los componentes que más corriente consumen (véase anexo 2). Se eligió una batería de 22000mAh pues la energía que provee es suficiente para alcanzar los 10km requeridos (véase cálculos en anexo 2); además, se eligió este modelo pues con sus 2449.4g era el más

ligero, y como ya se mencionó anteriormente, se necesita el mayor ahorro posible en peso para un vuelo más eficiente y largo.



Fig. 4.8 Batería LiPo de 22000 mAh [25]

Tabla 4.13 Datos técnicos Batería Pulse Lipo [25]

Datos técnicos	
Voltaje	22.2 V
Número de células	6S
Capacidad	22000 mAh
Ratio de descarga	25C
Ratio de carga	5C
Dimensiones	197 × 88 x 64 mm
Peso	2449.4 g
TAP de balance	JST-XH

#### 4.3.4 Sensor de voltaje y corriente

Saber en qué estado se encuentra la batería es fundamental para aplicaciones autónomas, ya que el sistema debe ser capaz de llegar a su lugar de destino teniendo la suficiente energía para lograrlo. Para saber cuánto de energía le queda a la batería se hace uso de este sensor y de un componente electrónico externo, en este caso el controlador de vuelo Pixhawk, que irá leyendo los valores de voltaje y corriente sensados, para que luego en base a estos datos y los algoritmos desarrollados en este, estime la capacidad actual de la batería. A continuación (figura 4.9) se muestra una curva típica de descarga de una batería de LiPo de 3.7V y 2000 mAh. La curva muestra cómo va variando el voltaje conforme se va usando la capacidad energética de la batería; de esta manera, en base al voltaje y al amperaje acumulado en el tiempo, el controlador puede estimar el estado de la batería. El sistema se usará hasta el 15% de nivel de carga en la batería, pues usar la batería por debajo del 10% de la carga de la batería puede causar daños permanentes y reducir el tiempo de vida de la batería. Además,

que por debajo del 10% el voltaje decae rápidamente (véase figura 4.9), lo que afecta la alimentación de los motores y la calidad del vuelo.



Fig. 4.8 sensor de voltaje y corriente Attopilot 180A [26]

Tabla 4.14 Datos técnicos sensor de voltaje y corriente Attopilot 180A [26]

Datos técnicos	
Voltaje de entrada máximo	50 V
Amperaje de entrada máximo	180A
Voltaje de salida (sensado de voltaje)	63.69mV / Volt
Voltaje de salida (sensado de corriente)	18.30mV / Amp
Dimensiones	19 x 15 x 4 mm
Peso	27.24g

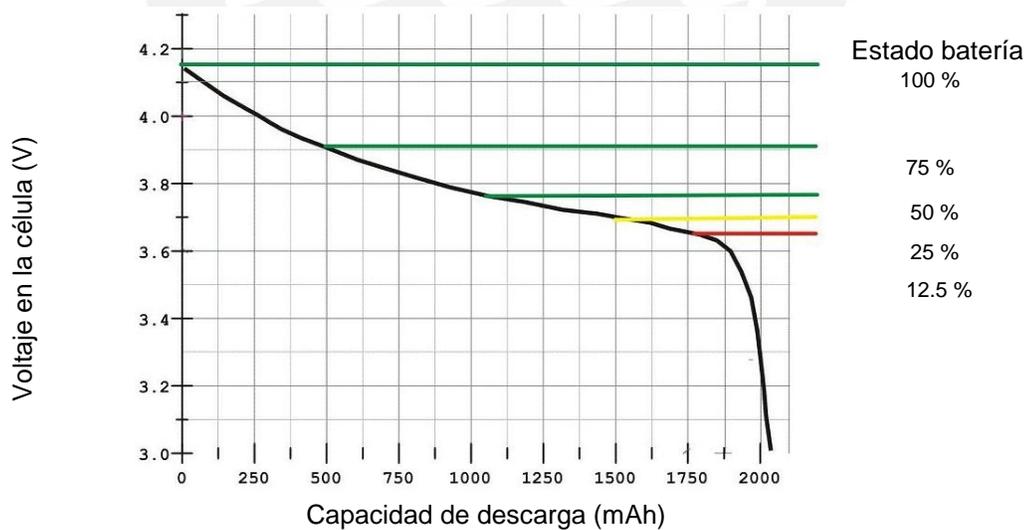


Fig. 4.9 Curva típica de batería de LiPo [27]

Se escogió el sensor Attopilot 180A pues este sensor tiene unos voltaje y amperaje de entrada máximos de 50V y 180A respectivamente, con lo cual podrá soportar los 22V de la batería y los más de 137A de corriente que puede pedir el sistema cuando los motores están al máximo de aceleración (véase tabla 27 de anexo 2). Además, se le escogió porque existe bastante

documentación sobre su uso junto con el controlador Pixhawk, lo que simplifica el proceso de fabricación.

#### 4.3.5 Regulador de voltaje

Los componentes electrónicos deben alimentarse según lo especifiquen sus fabricantes, es así que el voltaje que cada uno de estos consume en un sistema puede variar. Para esto se diseñan o se compran circuitos que reduzcan o amplifiquen el voltaje de la fuente según requieran estos dispositivos.

El diseño del hexacóptero presenta una batería de 22.2V y dos componentes, Pixhawk y el kit de desarrollo Nvidia Jetson Tx1 que deben alimentarse con 5V y 12V (véase tablas 16 y 17) respectivamente. Se escogió este regulador pues el rango de sus voltajes de entrada acepta el voltaje brindado por la batería (véase tabla 4.15). Además, tiene dos voltajes de salida que sirven para alimentar tanto el controlador de vuelo como el kit de desarrollo (véase tabla 4.15).



Fig. 4.10 Reductor de voltaje UBEC DUO 12V/5V [28]

Tabla 4.15 Datos técnicos reductor de voltaje UBEC DUO 12V/5V [28]

Datos técnicos	
Voltaje de entrada	7~26V
Voltaje de salida 1	5V, 0~4A, Máximo 6A
Voltaje de salida 2 (ajustable)	5V-6V-7.V-12V, 0~4A, Máximo 6A
Tamaño	58 x 36 x 8 mm
Peso	32g

#### 4.3.6 Controlador de vuelo

Los vehículos aéreos no tripulados necesitan ser pilotados de tal manera que puedan seguir una trayectoria deseada y tengan un vuelo estable. Se pueden diseñar circuitos electrónicos que realicen el control del vuelo, sin embargo al haberse popularizado los UAV's tanto en los últimos años estos circuitos se encuentran con facilidad y variedad en el mercado. Para garantizar lo anteriormente propuesto, estas computadoras presentan componentes tales como IMUs (unidad de medición inercial), controladores PID (control proporcional, integral

y derivativo), giroscopios, acelerómetros, entre otros. Además permiten añadir otros componentes tales como control remoto, GPS, otras computadoras, entre otros.



Fig. 4.11 Autopiloto Pixhawk [29]

Tabla 4.16 Datos técnicos autopiloto Pixhawk [29]

Datos técnicos	
Voltaje de entrada	4.8~5.4V
Salidas de servos	14 PWM
Periféricos	UART x 5 , CAN x 2, I2C, SPI
CPU	ARM Cortex M4 con FPU de 32-bits
Memoria	RAM de 168 MHz/256 kB
Dimensiones	81.5 x 15.5 x 50 mm
Peso	38g

Se escogió el autopiloto presentado pues su garantiza un vuelo estable, puede configurarse para hexacópteros fácilmente, se le puede conectar un GPS, se le puede conectar el sensor de batería y realizar el seguimiento al estado de la batería, se puede comunicar con una computadora externa y al ser uno de los más populares, presenta gran cantidad de documentación. El Pixhawk se puede configurar a través del software Mission Planner, el cuál es un software de código abierto, en el que se pueden configurar el tipo de marco del hexacóptero (figura 4.12 izquierda), las ganancias del controlador PID (figura 4.13 derecha), el modo de vuelo del Pixhawk, entre otros.

Además, existe documentación de los desarrolladores de este autopiloto sobre cómo conectarlo y configurarlo [45] para comunicarse con la computadora TX1 mediante el protocolo MAVLink[46] y realizar un control Offboard del Pixhawk.

## Configuración del presente trabajo

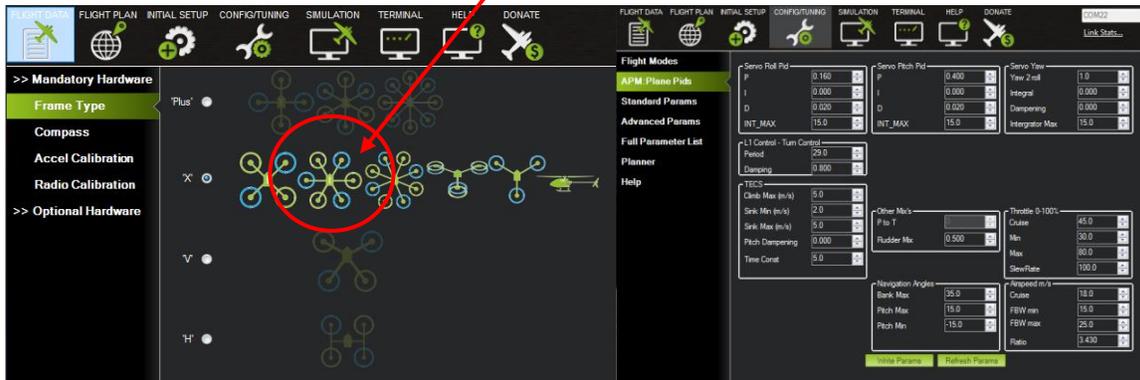


Fig. 4.12 Selección del tipo de marco en Mission Planner (izquierda), configuración de ganancias PID en Mission Planner (derecha). Fuente: Elaboración Propia

### 4.3.7 Kit de desarrollo de software

Los autopilotos (en este caso el Pixhawk) son las únicas computadoras necesarias en los UAVs cuando se realizan aplicaciones sencillas; es decir, cuando el único procesamiento que se necesita es controlar el vuelo de forma autónoma o por radio control, transmitir video, entre otras. Sin embargo, cuando se realiza un procesamiento más complejo, como por ejemplo de imágenes, se necesita una computadora adicional con las características necesarias para realizar dicho procesamiento. Así, en base a este procesamiento y a los algoritmos programados en la computadora adicional, transmitir al controlador de vuelo el camino a seguir.

En el presente trabajo se procesará la imagen de dos cámaras; una es la que proviene de la cámara termográfica, y la otra de profundidad. Ya que la segunda cámara requiere de mayor procesamiento (véase la resolución y los cuadros por segundo de las cámaras en las tablas 11 y 12), entonces se escogió una computadora que permita procesar esta imagen.

Los fabricantes de la cámara ZED recomiendan un mínimo de requerimientos del kit de desarrollo de software: procesador dual-core, 4GB de RAM y GPU Nvidia con capacidad de cómputo mayor a 2. Por los requerimientos antes descritos se escogió el kit para desarrolladores Jetson TX1 ya que presenta un procesador quad-core, 4 GB de RAM y una capacidad de cómputo igual a 5.2 (capacidad de cómputo se refiere a la versión de hardware de la tarjeta NVIDIA). De esta manera se aprovecha mejor las características de esta cámara (se la puede usar en las resoluciones más altas, con lo que se tendría mayor precisión en la lectura de profundidades), además se asegura el procesamiento de la imagen termográfica.



Fig. 4.13 Kit de desarrollo Jetson TX1 [30]

Tabla 4.17 Datos técnicos Kit de desarrollo Jetson TX1 [30, 31]

<b>Datos técnicos</b>	
Voltaje de entrada	5.5~19.6V
Máxima potencia consumida	15 Watts
Periféricos	USB 3.0, USB 2.0, HDMI, SD, I2C, TTL UART
Conectividad	Ethernet, WLAN, Bluetooth
CPU	Quad-core ARM® Cortex®-A57 MPCore
GPU	NVIDIA Maxwell GPU con 256 núcleos NVIDIA CUDA, capacidad de cómputo de 5.2
Memoria	16 GB eMMC 5.1
Dimensiones	171 x 171 x 16 mm
Peso	474g

#### 4.3.8 Controlador de velocidad electrónico y circuito de potencia

En el presente trabajo se utilizarán motores DC sin escobillas que trabajarán a potencias medias/altas, cuyas velocidades serán controlada a partir de señales moduladas por ancho de pulsos (PWM). Se puede diseñar un circuito que genere este tipo de señales y que también posea un circuito de potencia, sin embargo existen muchos de estos componentes en el mercado que las generan especialmente para este tipo de motores, teniendo en consideración amperaje máximo soportado por motor, el voltaje otorgado por la batería , tiempo de respuesta de aceleración , entre otros.

De esta manera se ha escogido este circuito pues, su voltaje de entrada puede trabajar con el voltaje otorgado por la batería de 22.2V (véase tabla 4.18), la corriente máxima que entrega está por encima del amperaje nominal máximo que los motores consumen (en este caso 35A,

véase tabla 4.20), y porque con sus 20g (véase tabla 4.14) tiene uno de los pesos más livianos en el mercado que harán más eficiente el vuelo.



Fig. 4.14 ESC DYS [32]

Tabla 4.18 Datos técnicos ESC DYS de 40A [32]

<b>Datos técnicos</b>	
Voltaje de entrada	7.4~22.2V
Corriente continua	40A
Corriente máxima	45A
Frecuencia de señal	20-500Hz
Frecuencia de PWM de salida	18KHz
Dimensiones	60 x 17 x 7.2 mm
Peso	20g

#### 4.3.9 Localización del sistema mecatrónico

Es imprescindible para un sistema mecatrónico móvil conocer su ubicación y orientación, pues este debe ser capaz de alcanzar puntos en donde deba realizar las tareas con que se le ha programado, existiendo diversas maneras de lograr esto, como por ejemplo con Navegación por estima (Dead reckoning en inglés) en donde se calcula la ubicación del sistema móvil en base a una posición inicial, orientación y distancia que se desplazó.

Este método, así como otros, es útil para localizar robots en interiores, donde no penetran las señales de los satélites, sin embargo para aplicaciones en exteriores lo más sencillo y eficaz es usar GPS, ya que este sensor sólo utiliza un receptor de las señales de los satélites y en base a estas calcula su ubicación, a diferencia de los demás métodos que por lo general requieren más sensores y mayor procesamiento, haciéndolos más complejos de implementar.

Se escogió este módulo pues, el hexacóptero se ubicará a 10 metros de las líneas, y una precisión de 2 metros (véase tabla 4.15) en la coordenada de inicio de vuelo no afectará al sistema ni al performance del vuelo, también porque con sus 16.8g (véase tabla 4.15) presenta uno de los pesos más livianos entre los módulos GPS. Asimismo, se le escogió porque tiene incorporado un compás que le permite conocer su orientación, y por la cantidad de documentación que existe sobre su uso con el controlador Pixhawk.



Fig. 4.15 GPS 3dr uBlox con kit de compás [33]

Tabla 4.19 Datos técnicos de GPS 3dr uBlox con kit de compás [33, 34]

Datos técnicos	
Frecuencia de actualización	5Hz
Antena de conexión	Cerámica
Conexión	Cable de 5-6 posiciones
Precisión de posición horizontal	2.0m
Precisión de velocidad	0.1 m/s
Dimensiones	38 x 38 x 8.5 mm
Peso	16.8g

#### 4.3.10 Motores

Los UAV's suelen ser impulsados por tres tipos de motores DC: sin núcleo, con escobillas y sin escobillas. Los primeros son utilizados para aplicaciones de muy bajo peso por soportar bajas potencias (de hasta 25W); los segundos, para aplicaciones de bajo presupuesto debido a que son más baratos y menos complejos de implementar que los motores DC sin escobillas, sin embargo son menos eficientes debido a que en las escobillas se genera fricción (véase figura 4.17 izquierda), lo que aumenta el trabajo del motor para mantener la misma velocidad y reduce el tiempo de vida de la batería. Ya que para esta aplicación el tiempo de vida de la batería es fundamental, puesto que uno de sus requerimientos es que recorra 10 km, se escogerá el último tipo de motores por ser los más eficientes, esto debido a que al no tener escobillas, no se pierde energía en la fricción que se genera en estas (véase figura 4.17 derecha).

Se escogió el motor DC sin escobillas MN5208 pues, con sus 145g, potencia continua máxima de 850W y máxima eficiencia usando corrientes de entre 5A y 10A (véase tabla 4.20), es uno de los motores más livianos y eficientes que soportan las fuerzas que precisa el sistema (véanse cálculos en Anexo 2).



Fig. 4.16 Motor DC sin escobillas MN5208 [35]

Tabla 4.20 Datos técnicos de motor DC sin escobillas MN5208 [35]

Datos técnicos	
KV	340
Configuración	34N22P
Voltaje de alimentación	14.8~22.2V
Corriente continua máxima	35A
Potencia continua máxima	850W
Corriente de máxima eficiencia (>84%)	5-10A
Resistencia interna	93mΩ
Precisión de velocidad	0.1 m/s
Dimensiones	Φ59 x 29.5 mm
Peso	145g

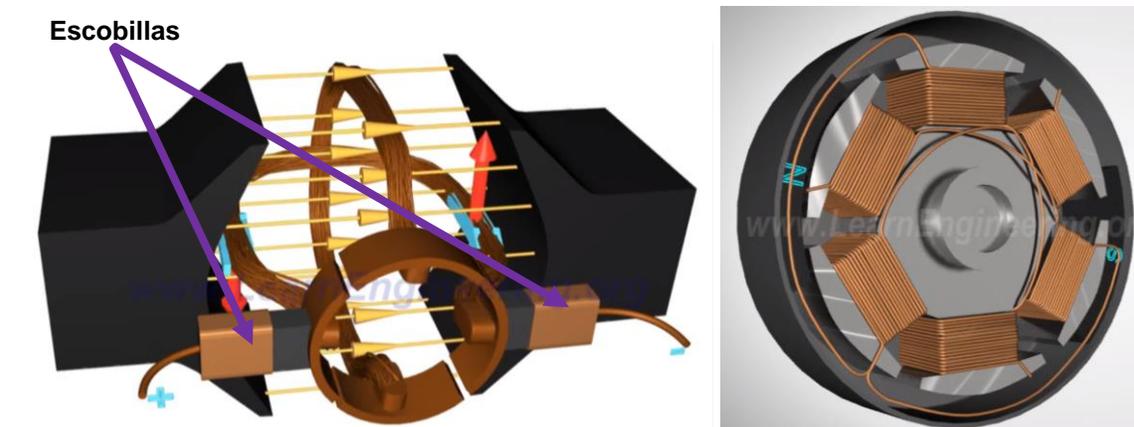


Fig. 4.17 Configuración motor DC con escobillas (izquierda) [36] Configuración motor DC sin escobillas (derecha) [37]



#### 4.4 Componentes mecánicos

A continuación se mostrarán algunas vistas de los planos de ensamble, para luego describir a detalle cada elemento que forma la estructura mecánica del sistema.

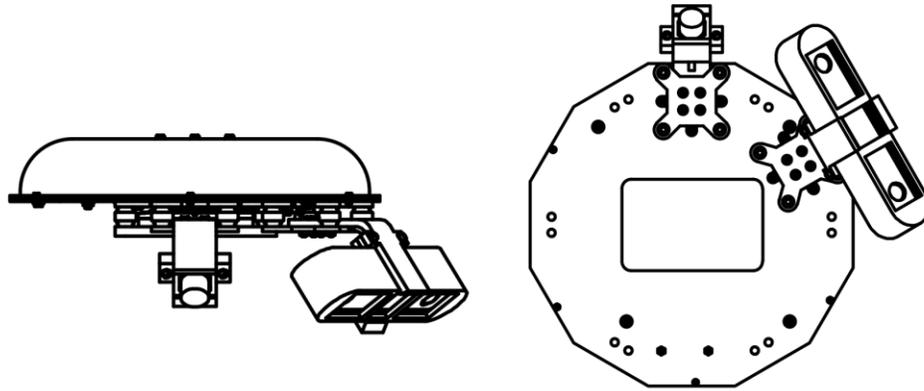


Fig. 4.18 Vistas de subensamble superior. Fuente: elaboración propia.

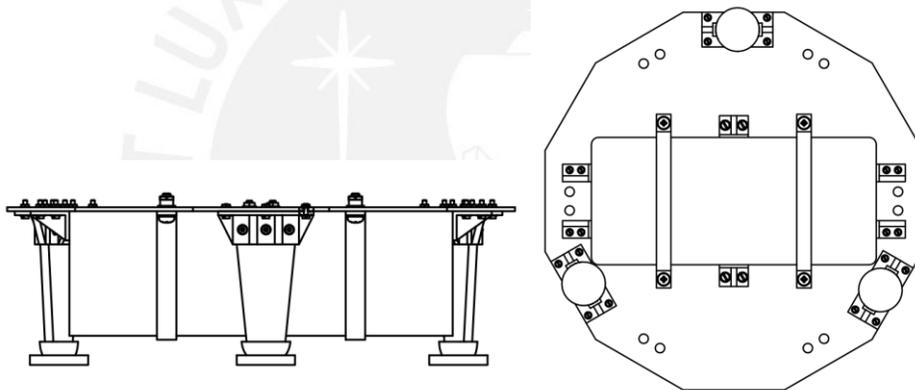


Fig. 4.19 Vistas de subensamble inferior. Fuente: elaboración propia.

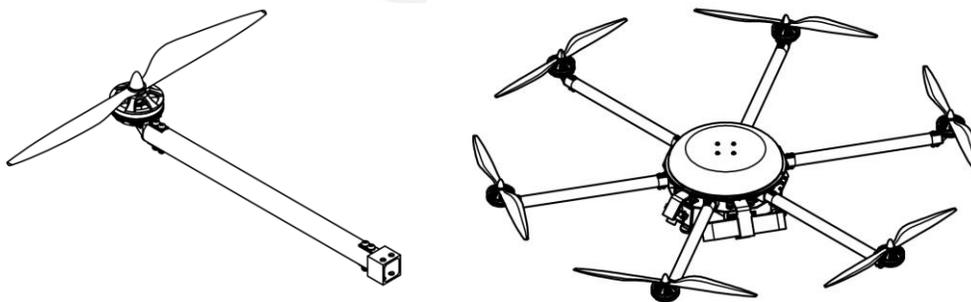


Fig. 4.20 Vistas de plano de subensamble de brazo (izquierda) y ensamble general (derecha). Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.1 Hélices

Los vehículos aéreos no tripulados necesitan una manera de sustentarse en el aire, los aeroplanos por ejemplo lo hacen debido a su aerodinámica; otros, como en el caso de los multirrotores se sustentan debido a la fuerza que generan sus hélices al girar.

Para escoger las hélices a utilizar en el sistema se tienen en cuenta dos factores fundamentales: diámetro y paso; mientras mayor sea el diámetro de la hélice mayor será la fuerza que esta le dé al sistema ya que mayor será el volumen de aire que empuje este diámetro al girar, el segundo factor influye en la velocidad, el paso es la distancia teórica que recorre la hélice cuando da una vuelta, de esta manera mientras mayor el paso mayor será la distancia que recorra la hélice en una vuelta por ende mayor velocidad tendrá la hélice y finalmente el sistema.

Algunos fabricantes de motores, como el que se ha escogido, también ofrecen hélices y muestran datos experimentales de la performance de sus motores con las distintas presentaciones de estas, para que sus clientes puedan escoger la que se adecúa a sus necesidades. Es así que, se escogieron unas propelas que maximicen el tiempo de vuelo de la siguiente manera:

- Se escoge el proceso más largo del vuelo, que es el recorrido de líneas (véase punto 1.4 de Anexo 2), para optimizar el uso de los motores.
- En este proceso, la fuerza que ejercen los seis motores es 60.088N (véase punto 1.4.3 en Anexo 2), y cada uno de 10.015N.
- En la tabla dada por el fabricante (véase tabla 27 del anexo 2) se tiene la fuerza en gramos, entonces (considerando la constante de gravedad como  $10\text{m/s}^2$ ), la fuerza sería 1001.5g.
- Según esta tabla, se buscó para cada configuración motor-propela cuál es la que tiene la máxima eficiencia (Fuerza/Potencia) para 1001.5g.
- Usando la fórmula de la recta para calcular la eficiencia entre los puntos que contienen la fuerza ejercida, se logró calcular que la propela 16\*5.4 ofrece la mayor eficiencia con proporción de 9.47 fuerza entre potencia.

De esta manera, se escogió la propela 16\*5.4 sugerida por el proveedor del motor.



Fig. 4.21 Hélice Tiger Motor 16x5.4 (izquierda) [38] hélice acoplada a motor (derecha).  
Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.21 Datos técnicos de Hélice Tiger Motor 16x5.4 [38]

Datos técnicos	
Diámetro	16 pulgadas
Paso	5.4 pulgadas
Tamaño tornillo	3, 6mm
Material	Fibra de carbono
Número de palas	2
Peso	28g

#### 4.4.2 Acople brazo-motor

Este elemento consiste de una sección plana en la cual se encuentra atornillado el motor, y otra sección circular, que se introduce en el brazo del hexacóptero y se atornilla, tal como se muestra en la figura 4.19. Para atornillar se usan tuercas hexagonales de seguridad; estas ofrecen resistencia a aflojarse ante las vibraciones.

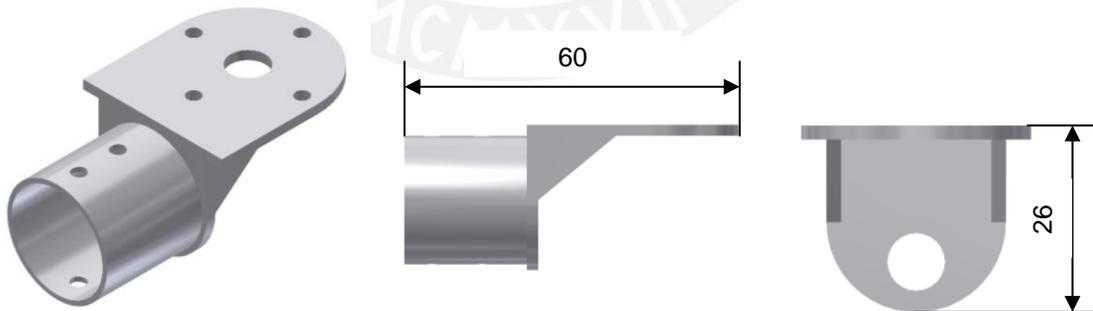


Fig. 4.22 De izquierda a derecha: acople brazo-motor vista isométrica, lateral y frontal.  
Fuente: elaboración propia.

Esta pieza cumple la función de acoplar el motor con el brazo, primero se le ensambla al brazo y luego al motor, tal como se muestra en la figura 4.20. En su diseño se consideró que sea una pieza ligera, que resista las fuerzas que se le ejercen (véase anexo 3) y que soporte la

temperatura en la superficie del motor de aproximadamente  $73^{\circ}$  [34]; es por esto que se la diseñó en policarbonato. Se escogió el policarbonato pues, es un material de extremado bajo peso (densidad de  $1.20\text{g/cm}^3$ ) y alta resistencia a los impactos (resistencia al impacto Izod de  $850\text{J/m}$ ). Además, por su baja deformación ( $2.4\text{ GPa}$ ) y su resistencia a altas temperaturas sin deformarse (punto de reblandecimiento de Vicat a  $145^{\circ}\text{C}$ ).



Fig. 4.23 De izquierda a derecha: vistas isométricas de elemento acoplado con brazo, con motor y brazo. Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.3 Acople brazo-cuerpo

Este elemento consiste de una sección circular, que se introduce en el brazo del hexacóptero y se atornilla, y otra sección cuadrada, que irá atornillada entre dos placas que vendrían a ser el cuerpo del hexacóptero, tal como se muestra en la figura 4.22. Para atornillar, al igual que en el caso anterior, se usan tuercas hexagonales autoblocantes.

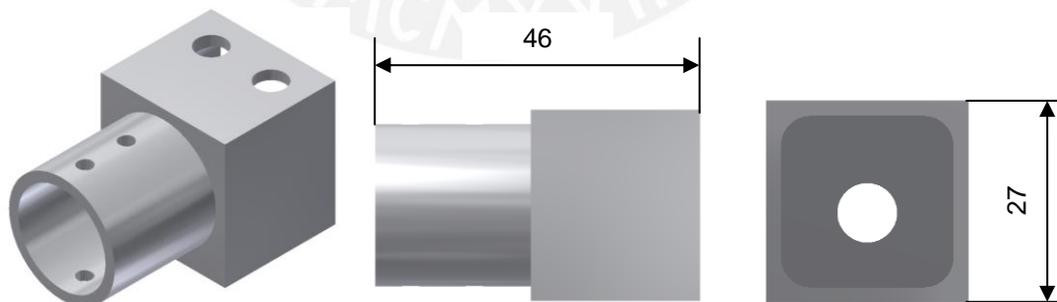


Fig. 4.24 De izquierda a derecha: acople brazo-cuerpo vista isométrica, superior y lateral. Fuente: elaboración propia.

Esta pieza cumple la función de acoplar el brazo con el cuerpo, primero se le ensambla al brazo y luego al cuerpo, tal como se muestra en la figura 4.20. En su diseño se consideró que

sea una pieza ligera y que resista las fuerzas que se le ejercen (véase anexo 3), por lo cual se le diseño en policarbonato.

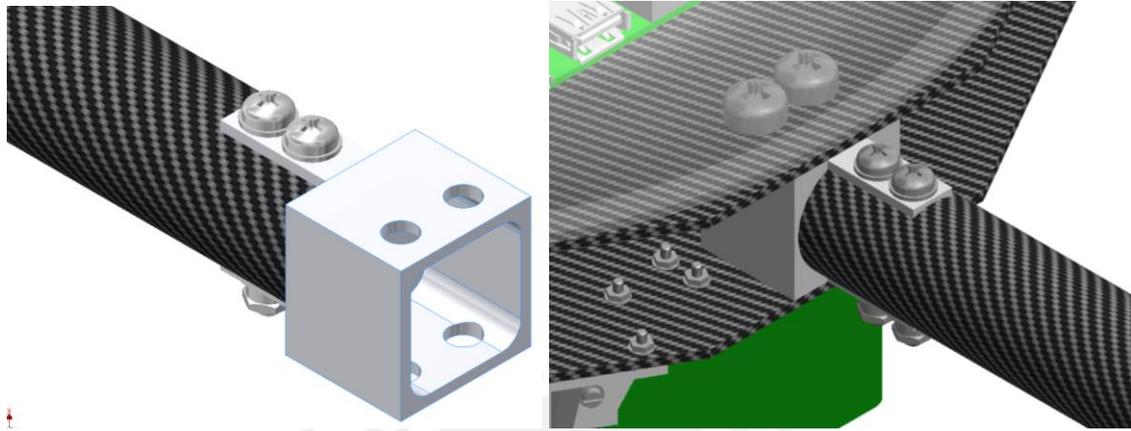


Fig. 4.25 De izquierda a derecha: vistas isométricas de elemento acoplado con brazo, con cuerpo y brazo. Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.4 Brazo

Este elemento consiste de un tubo de fibra de carbono de 2mm de espesor, está ensamblado como ya se ha descrito en los dos puntos anteriores con los acoples brazo-motor y brazo-cuerpo.



Fig. 4.26 Vista isométrica del brazo. Fuente: elaboración propia.

Esta pieza cumple la función de transmitir la fuerza del motor al cuerpo del hexacóptero para así elevar todo el sistema. En su diseño se consideró que sea un elemento ligero, que resista

las fuerzas que se le ejercen (véase cálculos en Anexo 2), y que le dé a las hélices un espacio de 95mm entre puntas, tal como se ve en la figura 4.24 derecha. Es por esto que se escogió como material fibra de carbono; ya que, es de bajo peso ( $1.60\text{g/cm}^3$ ), y tiene una alta resistencia a fuerzas cortantes (módulo de fuerza cortante de  $5\text{GPa}$ ), que son las que más se le ejercen en este elemento.

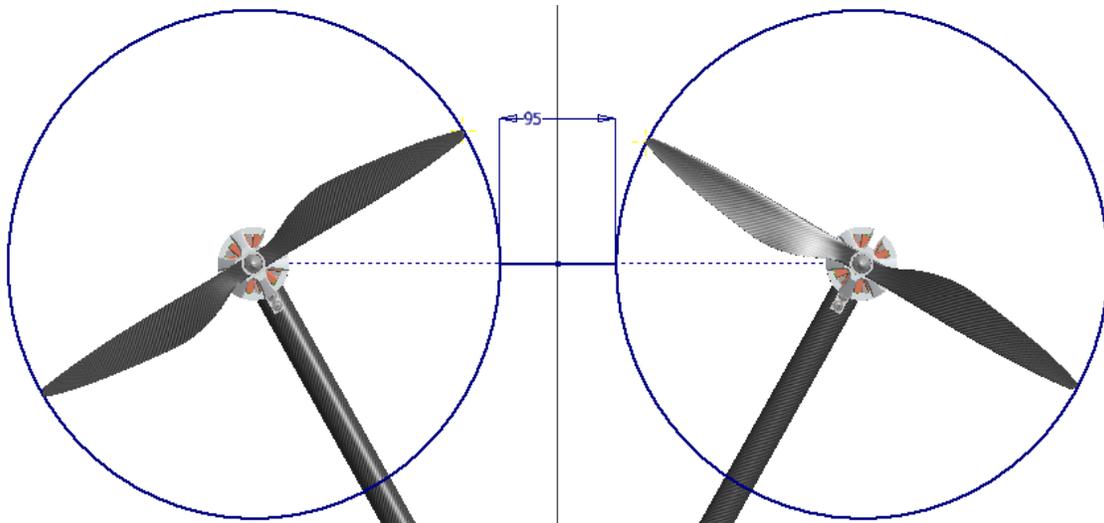


Fig. 4.27 Vista isométrica del brazo. Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.5 Montura antivibración para cámara

Este elemento consiste de dos soporte, diseñados en policarbonato, unidos por una goma antivibración DJI [38], tal como se aprecia en la figura 4.25.

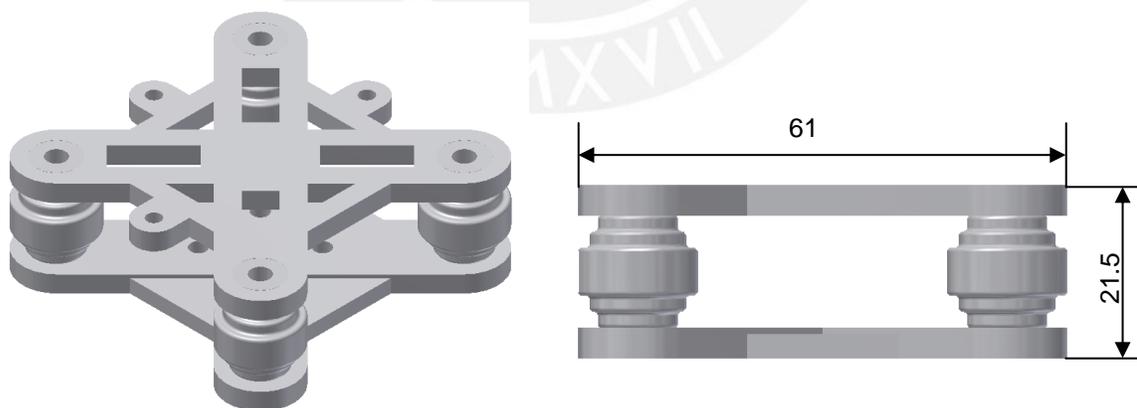


Fig. 4.28 Montura antivibración vista isométrica (izquierda), vista lateral (derecha).

Fuente: elaboración propia.

La función de esta pieza es crear una plataforma antivibraciones en donde se acoplarán las cámaras. De esta manera, se evita la captura de imágenes borrosas. Se escogieron las gomas antivibración para DJI Phantom 3 pues, las gomas antivibración son uno de los elementos que más se cambian en estos sistemas, y las DJI se pueden encontrar y adquirir fácilmente por su popularidad.

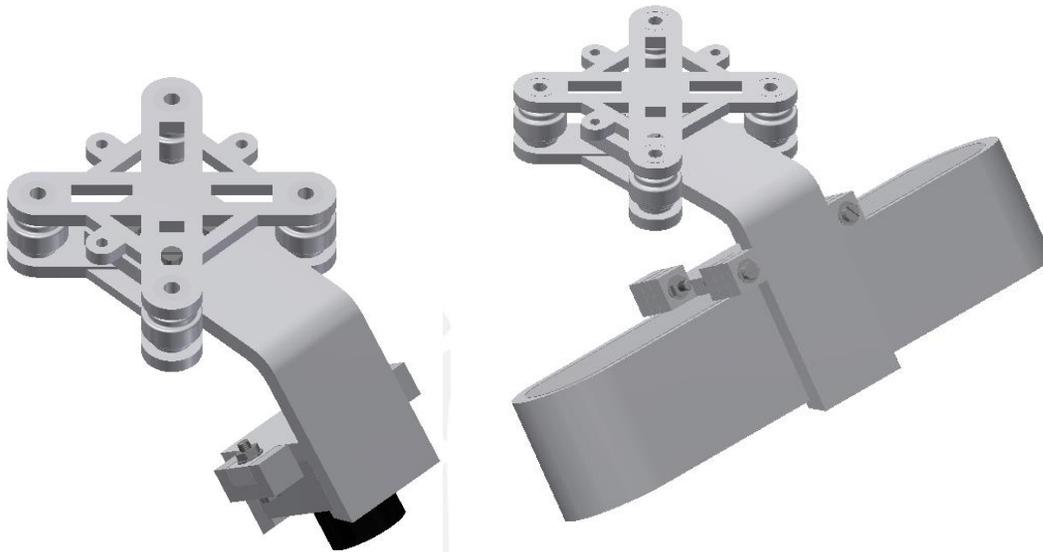


Fig. 4.29 Montura antivibración acoplada con cámara Quark 2 (izquierda), cámara ZED (derecha). Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.6 Montura antivibración para controlador de vuelo

Este elemento consiste de dos soportes de policarbonato unidos por cuatro gomas antivibración DJI, tal como se aprecia en la figura 4.27, además tiene una espuma 3M con pegamento en ambos lados [39] para así poder fijar el controlador de vuelo.

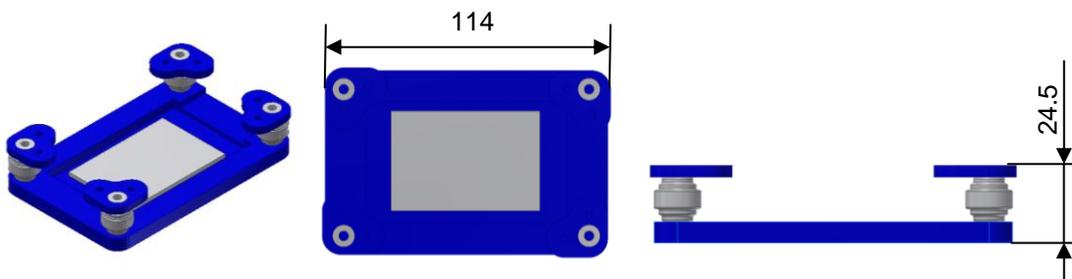


Fig. 4.30 De izquierda a derecha: montura antivibración para controlador de vuelo vista isométrica, superior y lateral. Fuente: elaboración propia.

La función de esta pieza es eliminar las vibraciones en el controlador de vuelo (véase figura 4.28), ya que con excesivas vibraciones la posición que este estime será imprecisa (la posición se calcula con los datos de los acelerómetros, que son sensibles a las vibraciones, del barómetros y del GPS) [40].



Fig. 4.31 Controlador de vuelo fijado a su montura antivibración. Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.7 Pierna acoplada

Este elemento consiste de una placa de fibra de carbono de 5 mm de espesor ensamblada al acople pierna-cuerpo tal como se muestra en la figura 4.32, además esta placa está pegada a un soporte de caucho que absorbe el impacto del aterrizaje.

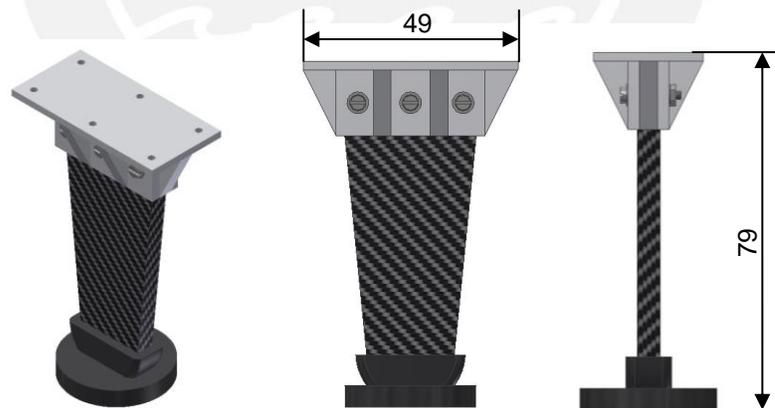


Fig. 4.32 De izquierda a derecha: pierna acoplada vista isométrica, superior y lateral. Fuente: elaboración propia.

La función de este elemento es la de soportar el peso del hexacóptero cuando este se encuentra reposando en tierra tal como se puede observar en la figura 4.30, además como ya se mencionó anteriormente absorbe el impacto del aterrizaje evitando así que su estructura o sus componentes se vean perjudicados por este.

#### 4.5 Diagrama de flujo de control

A continuación se mostrarán y explicarán los diagramas de flujo de control.

##### 4.5.1 Principal

Tal como muestra en la figura 4.34, el primer paso para comenzar una nueva inspección es encender el sistema; luego, si no se tienen parámetros guardados, se leen los parámetros necesarios para la inspección tales como fecha de inicio. Una vez se ingresan los parámetros se suspende el sistema hasta que sea la fecha y hora del comienzo del vuelo. Llegada la fecha programada del vuelo se verifica que la batería tenga más del 80% de carga, caso contrario se emite una alerta al usuario para indicarle que cargue la batería (esto ya que el usuario puede haberse olvidado de cargar la batería, o pensar que esta se encuentra llena). Luego de verificar la carga de la batería se verifica que el sistema se esté comunicando correctamente con ambas cámaras, en caso estas no se comuniquen correctamente el sistema emitirá una alerta para avisarle al usuario del error. En caso las cámaras se comuniquen correctamente se inicia el vuelo hacia el punto en donde se iniciará la inspección, una vez se llegue a este punto se configurará al sistema para empezar la inspección de las líneas (se le posicionará y orientará en la posición deseada). Luego de estar correctamente posicionado y orientado, el sistema seguirá e inspeccionará las líneas hasta el punto en el que se programó para finalizar la inspección. Una vez terminado el mantenimiento predictivo, el hexacóptero se dirigirá al punto en el que se le programó terminar el vuelo para finalmente aterrizar y enviar los datos de la inspección a una computadora a través de ethernet.

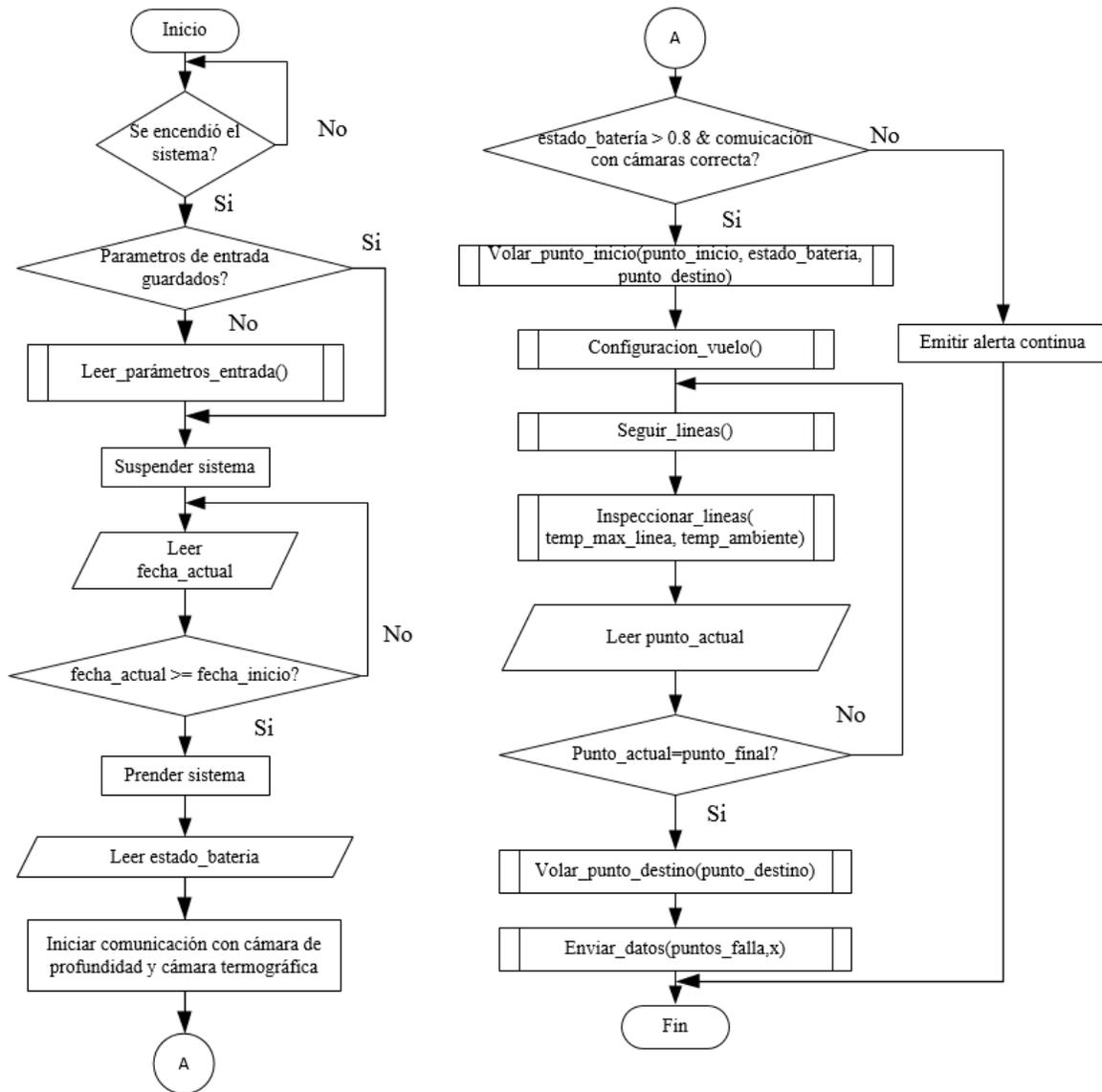


Fig. 4.34 Diagrama de flujo principal. Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.2 Leer parámetros de entrada

La función de este subprograma es recibir los parámetros de la inspección. Para esto, tal y como muestra la figura 4.35, el sistema se comunica con una computadora vía ethernet, luego se pide al usuario que ingrese los siguientes parámetros:

- fecha de inicio de inspección: Es la fecha y hora en que el sistema comenzará el vuelo, se verifica también que la fecha de inspección no haya pasado.
- Punto de inicio de inspección: Son las coordenadas en donde se comenzará a inspeccionar las líneas.
- Punto final de la inspección: Son las coordenadas en donde se terminará de inspeccionar las líneas.

- Punto de destino: Son las coordenadas en donde el sistema aterrizará, que pueden ser el lugar en donde despegó u otro.
- Temperatura máxima de la línea: Es la máxima temperatura que soporta la línea eléctrica a inspeccionar, dato que brindan sus fabricantes.
- Temperatura del ambiente: La temperatura actual del ambiente.

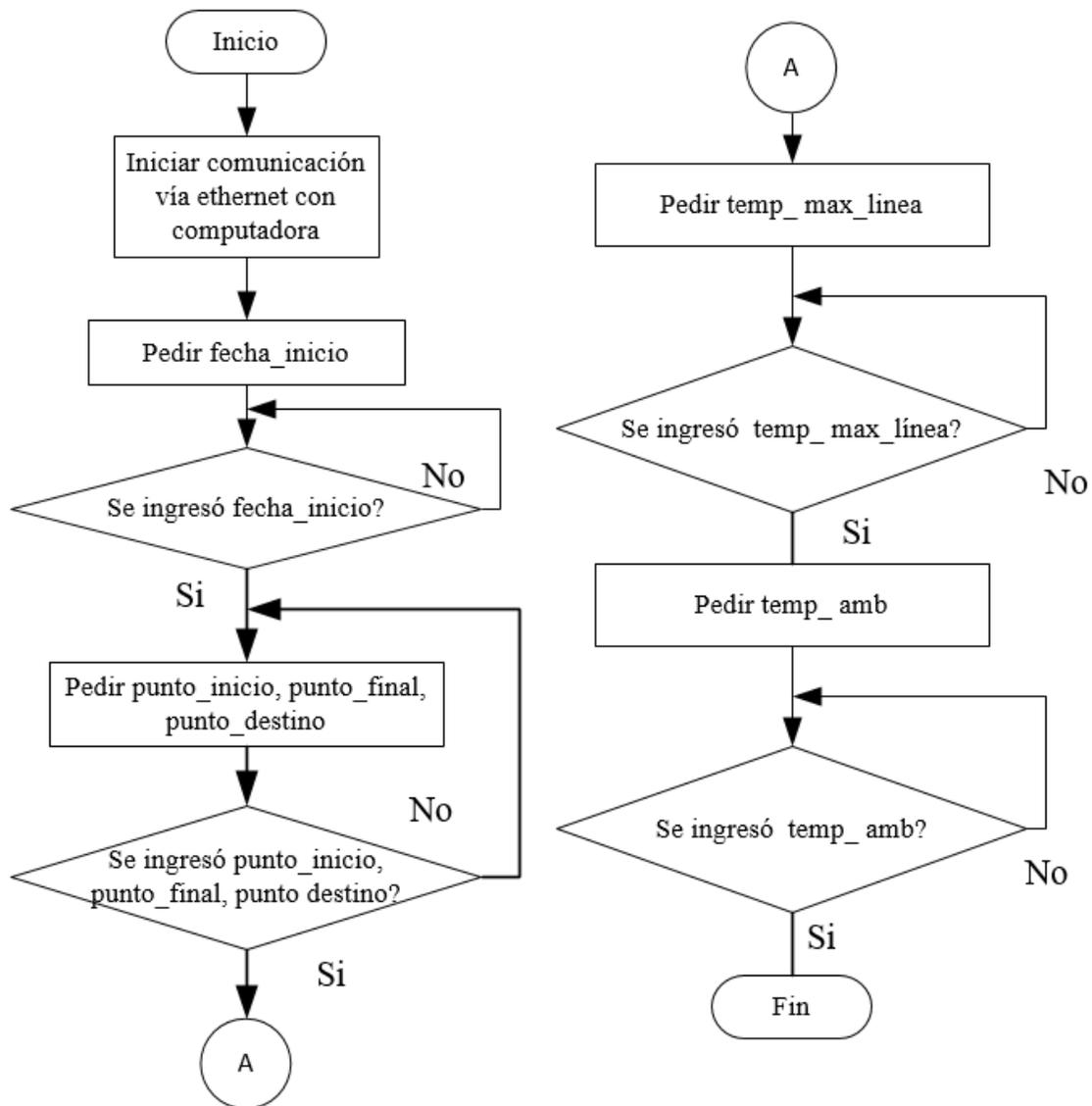


Fig. 4.35 Diagrama de flujo subprograma Leer\_parámetros\_entrada. Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.3 Volar a punto de inicio

La función de este subprograma es la de volar desde el punto de reposo del UAV hasta el punto en donde se comenzará la inspección. Para esto, tal y como se muestra en la figura 4.36, lo primero que se hace es iniciar la comunicación con ambas cámaras (la comunicación con ambas cámaras es fundamental pues de estas depende seguir e inspeccionar las líneas, evitar obstáculos, evitar estrellarse con el piso, entre otras), si no se tiene una comunicación correcta entonces se le mandará al programa principal el estado `com_cam_correcta = 0` para que de esta manera se cancele el vuelo. Si la comunicación con ambas cámaras es correcta se emitirá una alerta intermitente para avisar a las personas que el sistema está por volar, se comenzará a procesar la imagen de profundidad e inicializará la función que monitorea la batería. El hexacóptero no vuela directamente al punto de inicio de inspección sino que primero se eleva 20 metros sobre el piso (el máximo rango permitido por la cámara de profundidad) para así evitar pasar cerca de instalaciones eléctricas que se pueden encontrar dentro de su trayectoria, esto tomando en cuenta que el UAV puede ubicarse dentro de una subestación eléctrica. Una vez el hexacóptero se encuentre a 20 metros del piso se dirigirá al punto de inicio de inspección evitando obstáculos, a su vez volará a más de 15 metros del piso para así evitar pasar cerca de personas, casas, autos, entre otros.

Por último, una vez el UAV llegue a su punto de inicio de inspección detendrá su vuelo y se mantendrá sobrevolando en su mismo sitio.

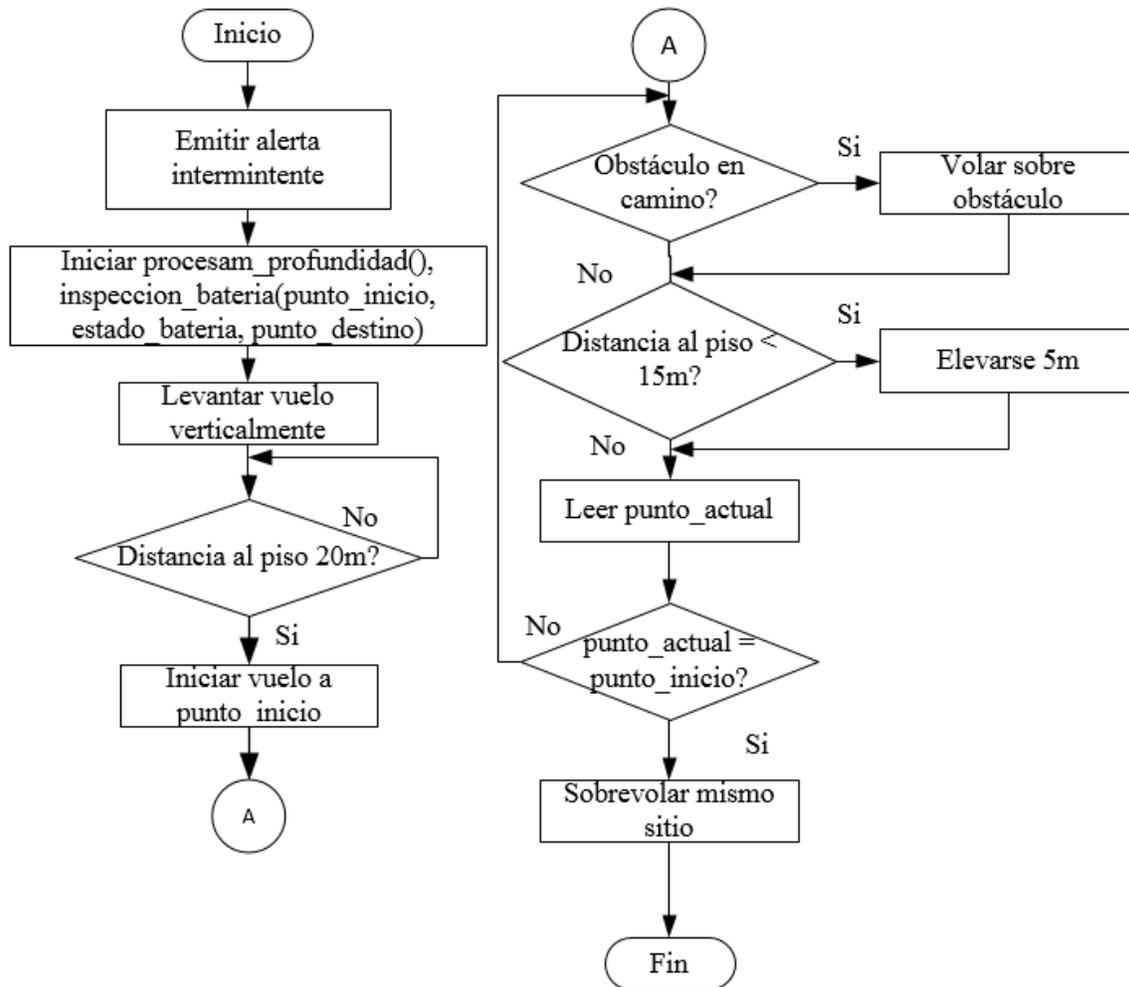


Fig. 4.36 Diagrama de flujo subprograma Volar\_punto\_inicio. Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.4 Configuración inicial del vuelo

La función de este subprograma es la de hacer las configuraciones iniciales del vuelo a través de las líneas eléctricas. En esta fase, y según la precisión del módulo GPS escogido, el sistema se encuentra a máximo 2 metros del punto de inicio de inspección. Como se ha escogido que la distancia mínima del sistema a las líneas sea de 10 metros, la distancia más cerca que estará el sistema a las líneas, debido a la precisión del GPS, será de 8 metros; y según los cálculos realizados en el Anexo 4, no habría problema debido a los campos magnéticos.

En primer lugar, tal y como se muestra en la figura 4.37, el sistema reconocerá las líneas eléctricas. Una vez detectadas las líneas, se dirigirá a la posición inicial; es decir, se elevará a 8.19 metros (que es igual a 10 metros por el seno de  $55^\circ$ ) de la fase S y 5.73 metros (que es igual a 10 metros por el coseno de  $55^\circ$ ) alejado horizontalmente de esta, ya que como se indicó en el punto 3.1 se requiere que el sistema se ubique a 10 metros de las líneas con un ángulo de elevación de  $55^\circ$  tal como se indica en la figura 3.3. Una vez ubicado el sistema

en el lugar de inicio de inspección, se declara la matriz que contendrá los puntos en los que se encontró fallas potenciales. Finalmente se inicia el procesamiento de la cámara termográfica.

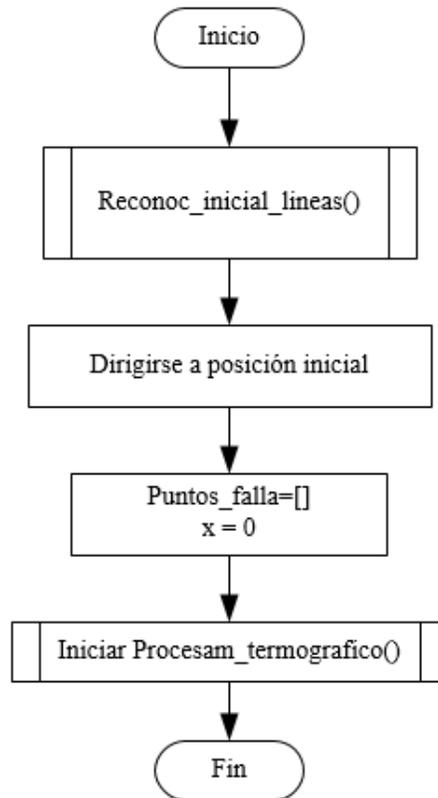


Fig. 4.37 Diagrama de flujo subprograma Configuración\_vuelo (izquierda). Movimientos del sistema (derecha). Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.5 Seguir líneas eléctricas

La función de este subprograma es la de seguir a las líneas eléctricas. Para esto, tal y como se muestra en la figura 4.38, en base a la lectura de la cámara de profundidad (que nos da la posición relativa de la línea eléctrica hasta a una distancia de 20 metros), y la información que nos da el controlador de vuelo (su orientación y su velocidad) determinará la distancia horizontal y vertical entre la línea eléctrica y el sistema luego de 1 metro. Si la distancia vertical que se proyecta a 1 metro difiere de la distancia vertical que debe existir entre el UAV y la línea entonces se le ordenará al controlador de vuelo elevar o descender tantos metros como es la variación, lo mismo para la distancia horizontal.

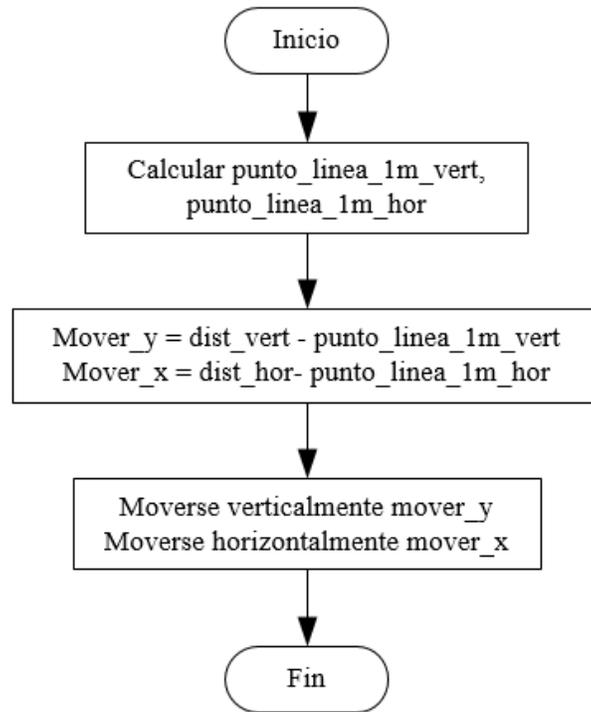


Fig. 4.38 Diagrama de flujo subprograma Seguir\_lineas. Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.6 Inspeccionar líneas eléctricas

La función de este subprograma será detectar cuándo existen fallos en la línea. Para detectar cuándo un elemento en la línea está fallando se ha tomado en cuenta el estándar para pruebas en equipos eléctricos brindado por la NETA. En la tabla 22 se muestra las acciones recomendadas basadas en la diferencias de temperaturas. Por ejemplo, según la tabla, si de las tres fases que se están inspeccionando dos de ellas tienen 50°C y otra está trabajando con 70°C entonces la acción recomendada por la NETA es de reparar este elemento inmediatamente, ya que las tres líneas son componentes similares bajo similar carga y su diferencia de temperatura es mayor a 15°C. Debe acotarse que para el presente trabajo se considerarán los fallos desde el segundo caso y con las diferencias más altas (15°C para componentes similares y 20°C entre ambiente y componente).

Tal y como se muestra en la figura 4.39, el primer paso es leer la imagen termográfica, luego se extraerá el elemento enfocado de la imagen, que en este caso serán las líneas, tal como se muestra en la figura 4.37 (utilizando el método del trabajo de investigación “*Learning to Extract Focused Objects From Low DOF Images*” [40]). Luego de extraída la imagen, se analiza si la temperatura de la línea (que en este caso sería la primera moda del histograma, ya que es el elemento con mayor cantidad de píxeles con una misma intensidad en la imagen) es mayor a su temperatura máxima permitida (dato de fabricante), si es así se registra un fallo. En caso no sea así, se compara si la temperatura de la línea es mayor a la temperatura del

ambiente (que es un dato de entrada) en 20°C, si resulta así se registra un fallo. En caso contrario, se analiza si el histograma de la imagen tiene una distribución normal (lo cual significa que la temperatura de las 3 fases es la misma, tal como se muestra en la figura 4.38 izquierda), no existen fallos. Si es que no tiene una distribución normal (que significa que existen uno o varios componentes con temperaturas distintas, tal como se muestra en la figura 4.38 derecha) se analizará una por una las diferencias de temperatura entre la línea con los componentes (que vendrían a ser las modas restantes, por ser elementos con menor cantidad de píxeles que la línea); si es que la diferencia entre ambos es mayor a 15°C se registrará un fallo. De no ser así no existe fallo.



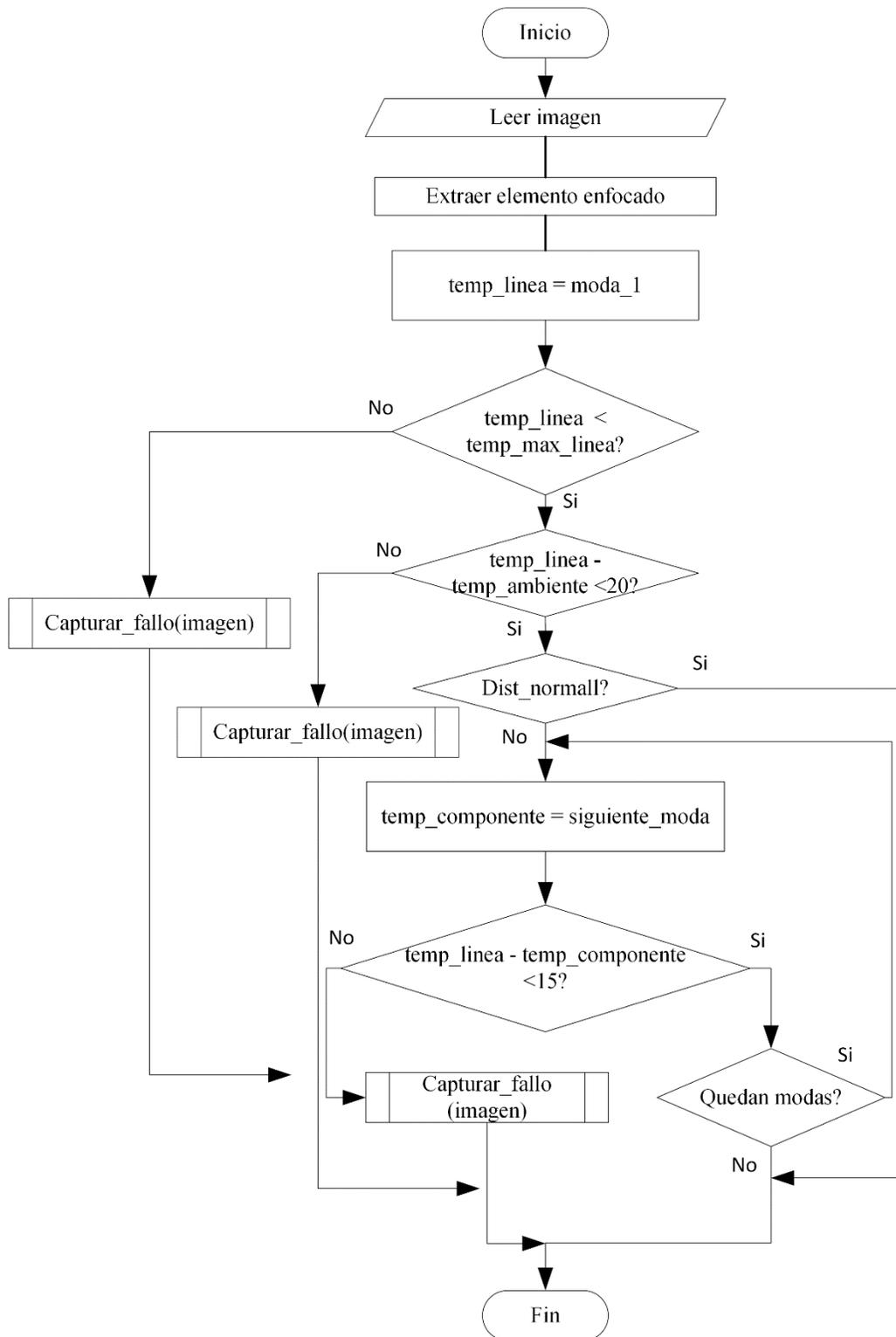


Fig. 4.39 Diagrama de flujo subprograma Inspeccionar\_líneas. Fuente: elaboración propia.

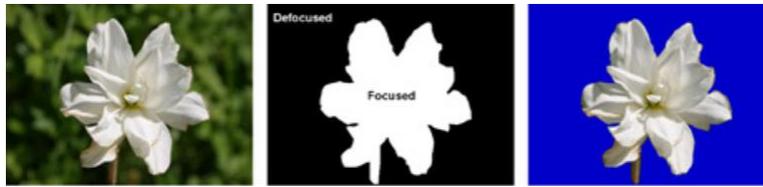


Fig. 4.40 Procesamiento de imagen para extraer objeto enfocado [40].



Fig. 4.41 Imagen termográfica con una sola temperatura (distribución normal) [41] (izq.)  
 Imagen termográfica con dos temperaturas (distribución bimodal) [42] (der.)

Tabla 4.22 Acciones sugeridas basadas en diferencias de temperaturas [43]

Diferencia de temperatura entre componentes similares bajo similar carga (°C)	Diferencia de temperatura entre componentes temperatura de aire del ambiente (°C)	Acción recomendada
1-3	1-10	Deficiencia posible, garantiza investigación
4-15	11-20	Indica deficiencia probable; reparar cuando tiempo permita
-----	21-40	Monitorear hasta que medidas correctivas se puedan realizar
>15	>40	Discrepancia importante; reparar inmediatamente

#### 4.5.7 Volar a punto de destino

La función de este subprograma es la de volar al punto de destino del sistema. Para esto el sistema detendrá su vuelo (sobrevolará en el mismo sitio), luego se elevará 10 metros para así evitar pasar cerca de la línea cuando vuele de regreso. Una vez volando de regreso se evitará que el sistema colisione con algún objeto en su trayectoria, asimismo el UAV se mantendrá a 15 metros del suelo para así evitar pasar cerca de personas, carros, árboles, casa, entre otros. Cuando el hexacóptero haya llegado al punto de destino sobrevolará en su mismo sitio y comenzará su descenso lentamente hasta que la cámara de profundidad no detecte cambios en la distancia al piso, ya que cuando no se detectan cambios es porque el sistema ya no puede bajar más por ende ya llegó al piso. Finalmente se cesará la comunicación con la cámara de profundidad y se apagarán los motores.

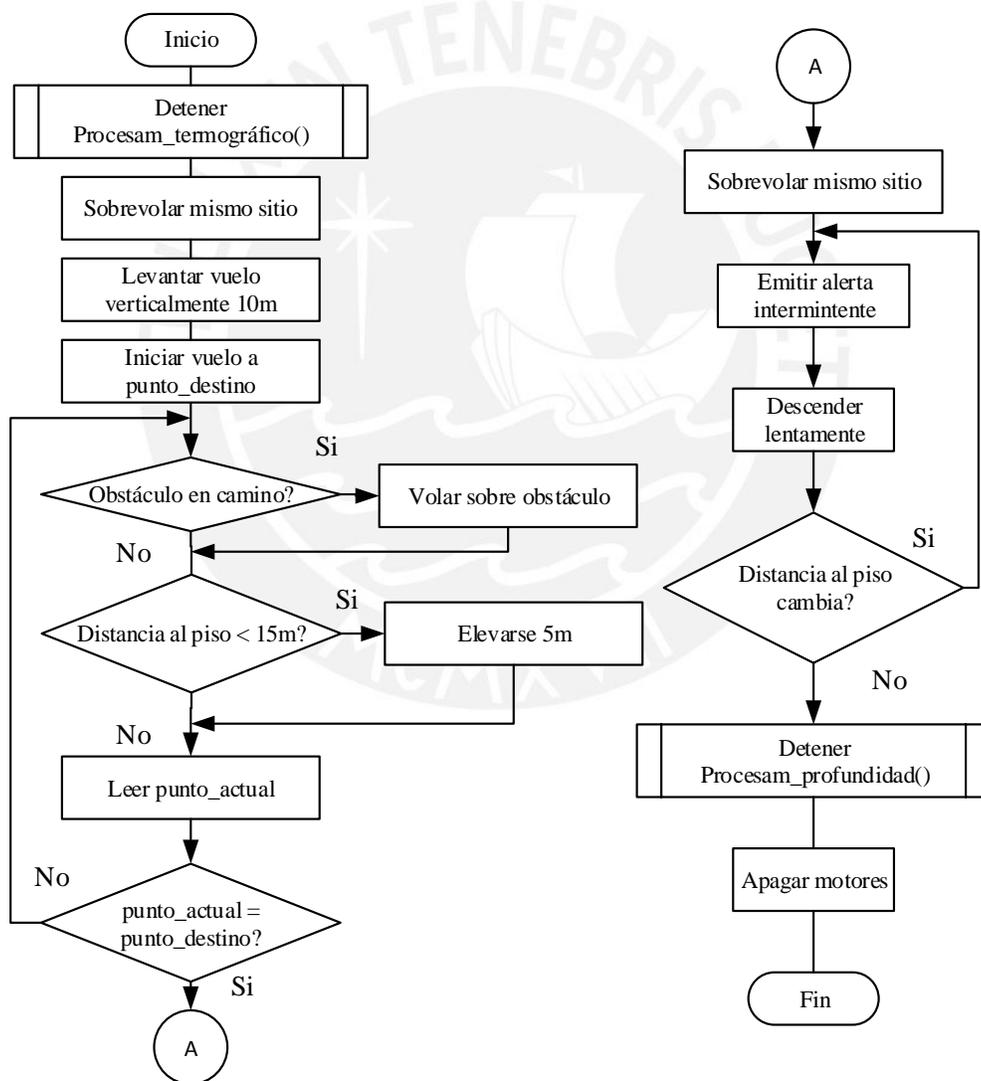


Fig. 4.42 Diagrama de flujo subprograma Volar\_punto\_destino. Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.8 Enviar datos

La función de este subprograma es enviarle a la computadora (usuario) la información de todos los puntos en los que se encontró fallos, caso contrario enviar un mensaje en el que se especifique que estos no se han detectado. Una vez se hayan enviado todos los fallos, o el mensaje, se le enviará al usuario el estado en el que se encuentra la batería y se le avisará que el sistema se apagará, para finalmente apagar este.

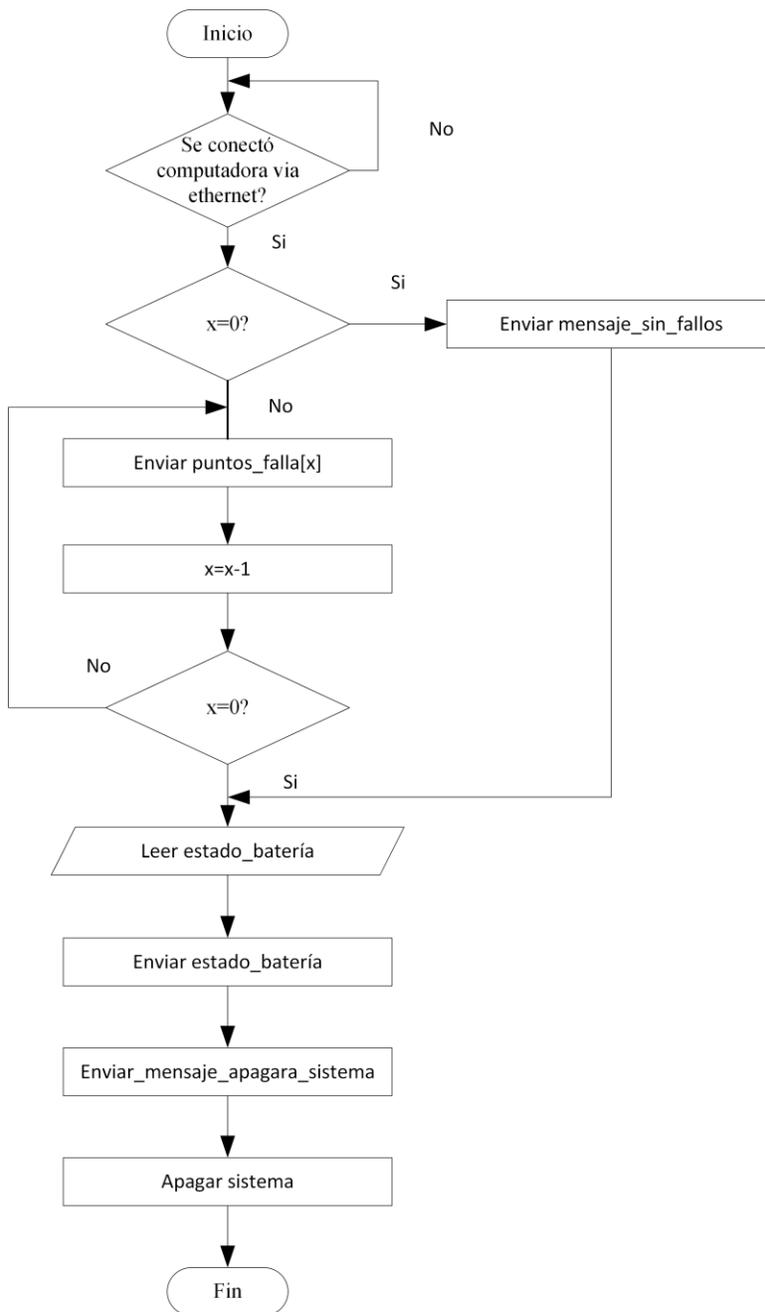


Fig. 4.43 Diagrama de flujo subprograma Enviar\_datos. Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.9 Inspección de batería

La función de este subprograma es cuidar en todo momento que el sistema tenga la suficiente energía disponible para llegar a su destino, o en todo caso, regresar al lugar en donde inicio su vuelo. Esto lo realizará comparando el porcentaje de batería que se ha usado hasta el momento con el porcentaje de batería que queda menos 15%; esto porque, tal como se ha mostrado en la figura 3.9 una vez que la batería de litio-polímero llega a un aproximado de 12.5% su carga total, el voltaje de sus celdas decae rápidamente, lo que afectaría al correcto funcionamiento del sistema pues los componentes electrónicos no se alimentarían con el voltaje requerido. Entonces el porcentaje de batería que queda menos 15% es el porcentaje de energía útil que queda en la batería.

Si el resultado indica que ya se ha consumido la mitad de energía disponible en un principio ( $\text{estado\_bateria} - 0.15 \leq \text{bat\_usada}$ ), y además la distancia que falta por recorrer es más grande que la distancia que ya se recorrió, entonces se actualizará el punto de fin de inspección con el punto actual, para que de esta manera el sistema regrese al punto de donde inició el vuelo.

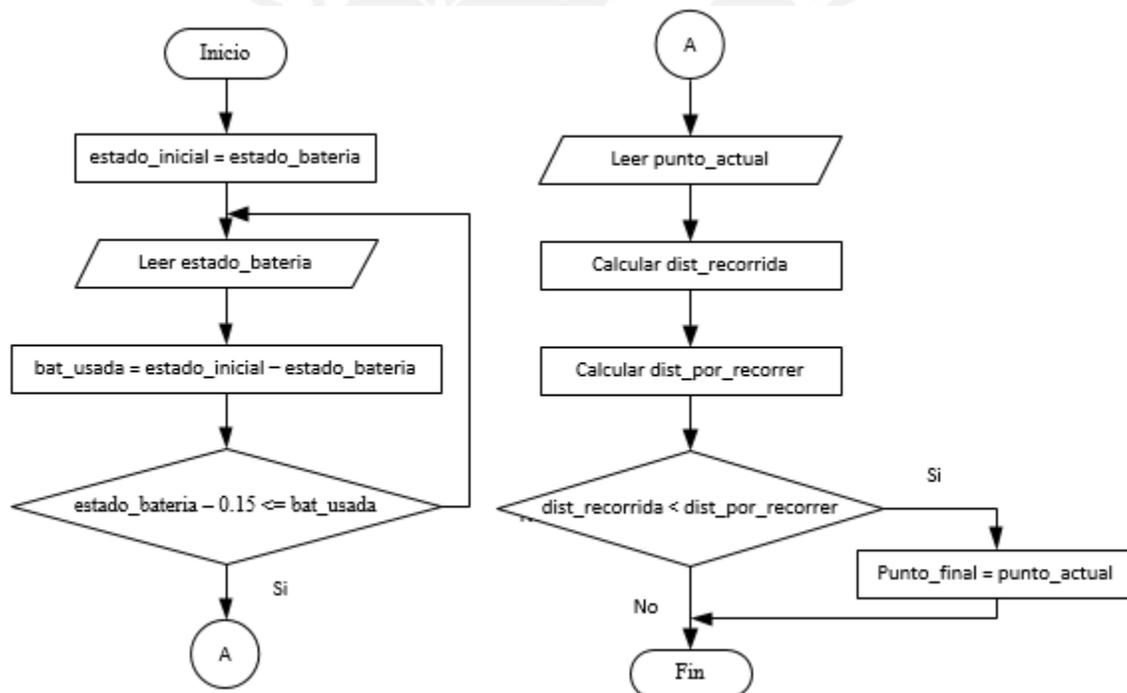


Fig. 4.44 Diagrama de flujo subprograma Inspeccion\_bateria. Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.10 Capturar fallo

La función de este subprograma es guardar los puntos en los que se encontró una posible falla. Conforme se detecten nuevos fallos se irán añadiendo a la lista; estos se grabarán con los siguientes atributos: imagen térmica del fallo, hora y lugar en que se registró.

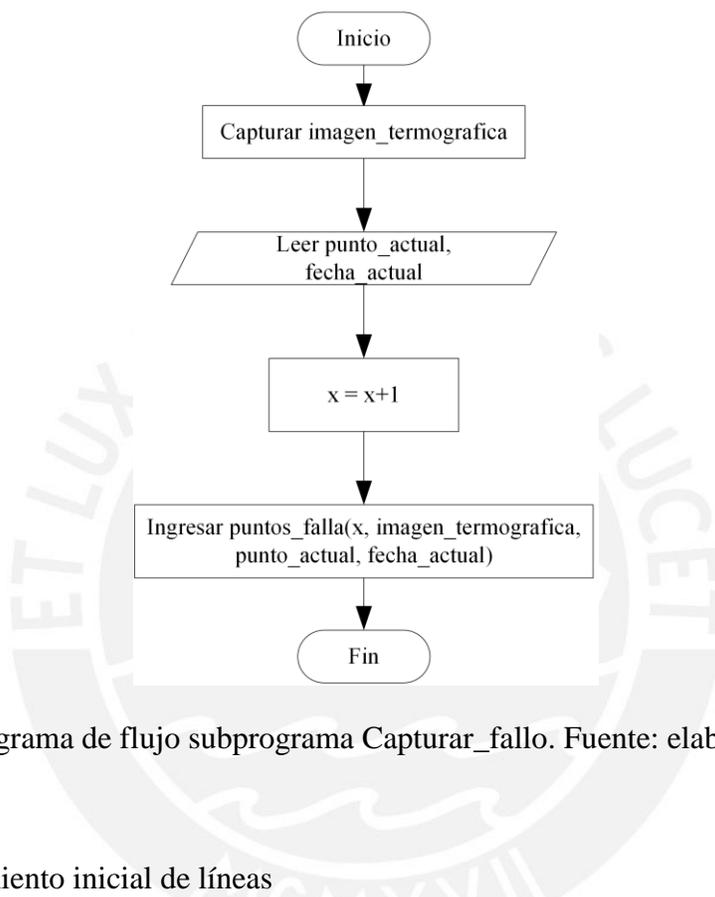


Fig. 4.45 Diagrama de flujo subprograma Capturar\_fallo. Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.11 Reconocimiento inicial de líneas

La función de este subprograma es la de reconocer las líneas eléctricas y orientar el multicoptero. Para ello, el sistema que se encuentra en el punto de inicio de inspección cerca de las líneas, realizará un movimiento yaw positivo de 15° (véase figura 4.46, es decir girará sobre su eje Z en sentido horario). En cada giro, el sistema leerá la imagen de la cámara de profundidad para tratar de reconocer las líneas de la siguiente manera: se divide la imagen en 5 regiones verticales, y se toma la región del medio; de esta manera, la catenaria se parecerá lo más posible a una línea horizontal por lo que facilitará el proceso de reconocimiento de las líneas eléctricas. Luego, umbralizamos los puntos que se encuentran a más de 13 metros, ya que las líneas se encontrarán a máximo 12 metros y así se eliminarán los puntos más lejanos, simplificando el reconocimiento. Después, se segmentará la imagen usando el método de Otsu, de esta manera quedarán las líneas y posiblemente la torre, eliminando el fondo. Finalmente, se segmentará la imagen usando una máscara de Sobel de gradiente horizontal para eliminar la posible torre u otros objetos cerca de las líneas, y que sólo se

queden las líneas eléctricas (es por esto que se separó en regiones más pequeñas la imagen, para que la catenaria tienda a una horizontal).

Para cada giro, se sumarán las distancias de cada punto captado en la imagen procesada, y se comparará con la suma de la imagen anterior para saber si esta suma es menor, si es menor se guardará su número de giro y su valor. Este proceso se repetirá, hasta completar los  $360^\circ$  de giro. Como los puntos otorgados por la cámara de profundidad indican distancia, la suma menor indica que la cámara de profundidad apunta directamente a las líneas. Por último, el sistema girará al punto en donde la suma es menor, y además girará  $60^\circ$ , ya que esa es la orientación que debe tener la cámara de profundidad, tal como se muestra en la imagen 3.6 derecha.

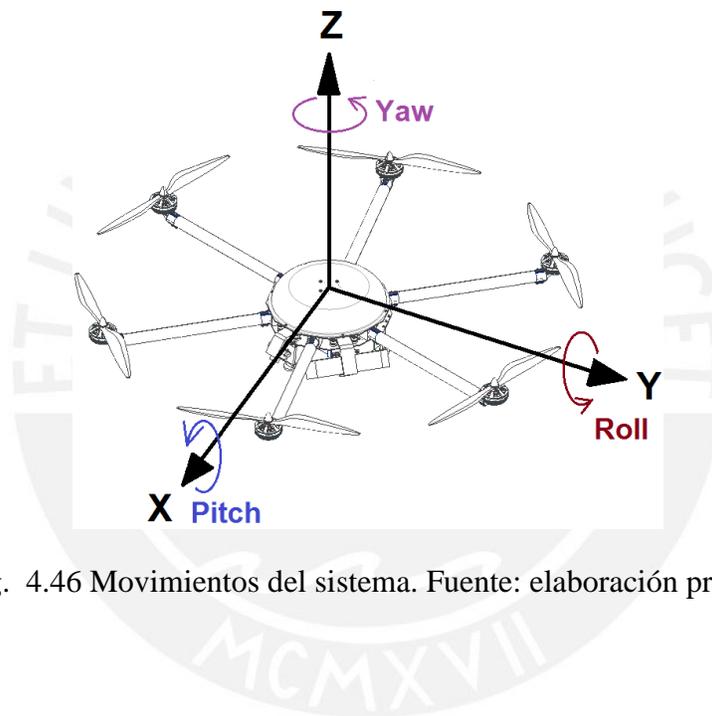


Fig. 4.46 Movimientos del sistema. Fuente: elaboración propia.

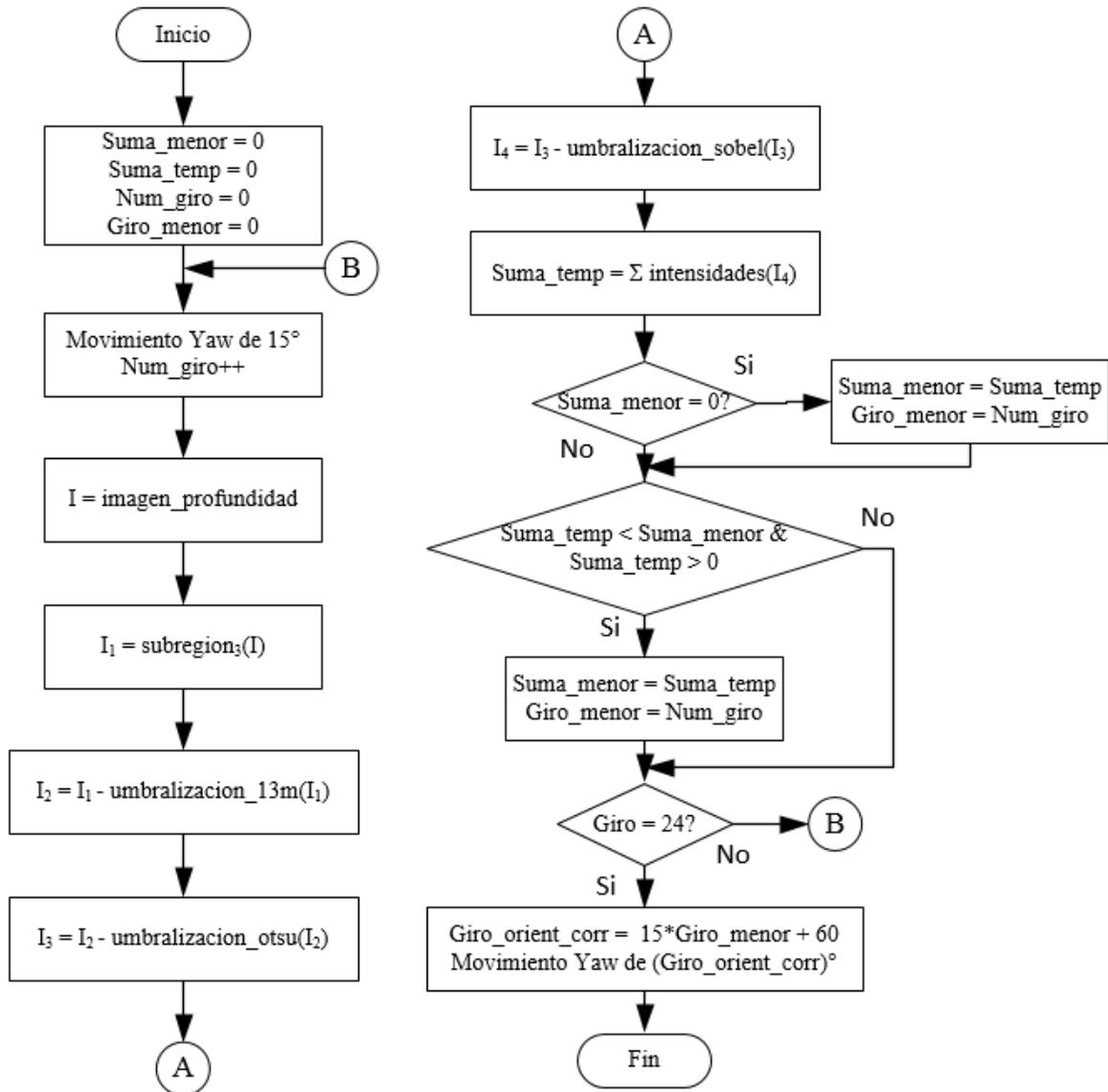


Fig. 4.47 Diagrama de flujo subprograma Reconoc\_inicial\_lineas(). Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.12 Inspección de cámara termográfica

La función de este subprograma es velar en todo momento que el sistema se comunique correctamente con la cámara termográfica. Si el sistema no se comunica correctamente con la cámara termográfica, se guardarán los parámetros de entrada, para que al reiniciar el sistema ya no se lean nuevamente. Asimismo, actualizará el punto de inicio de inspección para que empiece donde ocurrió el error de comunicación. Luego, el sistema descenderá emitiendo una alerta constante para avisar que está descendiendo hasta llegar al piso, donde se reiniciará, esperando poder recuperar la comunicación. En caso no se recupere la

comunicación, y según el diagrama de flujo principal, el sistema emitirá una alerta constante para revelar su posición y su estado de error.

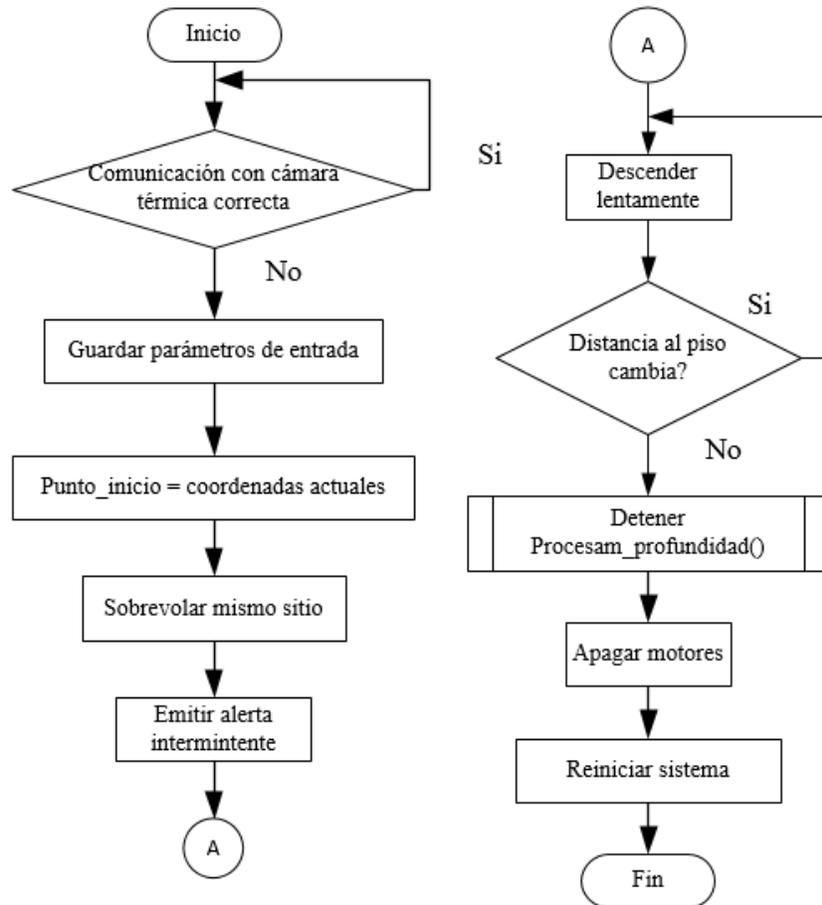


Fig. 4.48 Diagrama de flujo subprograma Inspeccion\_bateria. Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.13 Inspección de cámara de profundidad

La función de este subprograma es velar en todo momento que el sistema se comunique correctamente con la cámara de profundidad. Si el sistema no se comunica correctamente con esta cámara, se guardarán los parámetros de entrada, para que al reiniciar el sistema ya no se lean nuevamente. Asimismo, actualizará el punto de inicio de inspección para que empiece donde ocurrió el error de comunicación. Luego, el sistema descenderá emitiendo una alerta constante para avisar que está descendiendo hasta llegar al piso, donde se reiniciará, esperando poder recuperar la comunicación. Cabe resaltar que, en el caso que falle la cámara de profundidad, se usará la altitud brindada por el GPS para poder definir si se llegó al piso, verificando si la altitud ha cambiado o no; si la altitud ya no varía, significa que el sistema

ha tocado piso. En caso no se recupere la comunicación, y según el diagrama de flujo principal, el sistema emitirá una alerta constante para revelar su posición y su estado de error.

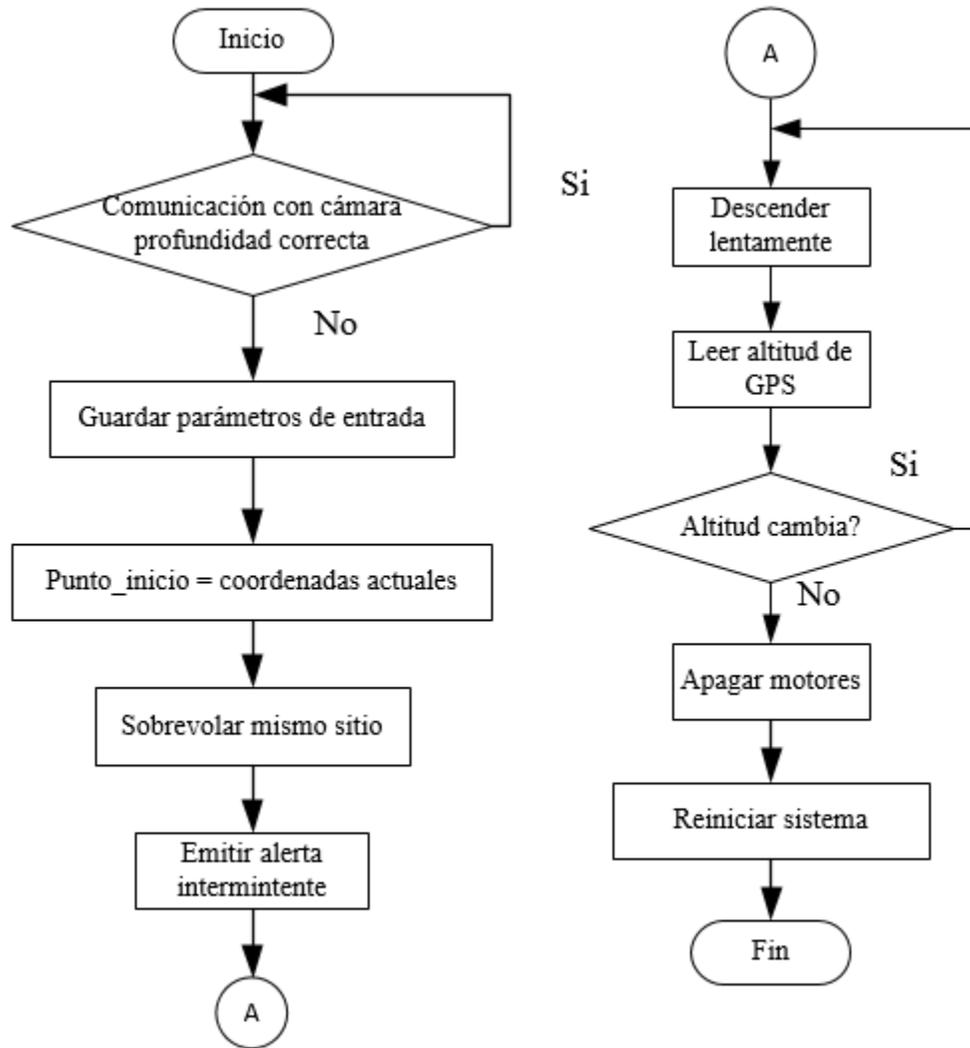


Fig. 4.49 Diagrama de flujo subprograma Inspeccion\_bateria. Fuente: elaboración propia

## COSTOS DEL SISTEMA

### 5.1 Componentes electrónicos

En la siguiente tabla se mostrarán los costos de cada componente electrónico presente en el sistema.

Tabla 5.23 Costos de componentes electrónicos. Fuente: Elaboración Propia.

Componente	Cantidad	P. unitario (\$)	P. Total (\$)
Batería	1	435.00	435.00
Bocina	1	3.50	3.50
Controlador de velocidad electrónico	6	12.36	74.16
GPS	1	90.00	90.00
Cámara termográfica	1	8,850.00	8,850.00
Cámara de profundidad	1	450.00	450.00
Sensor de voltaje	1	20.00	20.00
Reductor de voltaje	1	15.00	15.00
Autopiloto	1	200.00	200.00
Kit de desarrollo de software	1	600.00	600.00
Paquete gomas antivibración	1	9.25	9.25
Motor	6	100.00	600.00
Hélice	6	50.00	300.00
Espuma adherente	1	0.50	0.50
			<b>11,647.41</b>

## 5.2 Componentes mecánicos

En la siguiente tabla se mostrarán los costos de cada componente mecánico presente en el sistema.

Tabla 5.224 Costo de componentes mecánicos. Fuente: Elaboración Propia.

Componente	Cantidad	P. unitario (\$)	P. Total (\$)
Tubo de fibra de carbono 25x23x450mm	6	23.00	138.00
Plancha de fibra de carbono 500x400x2	2	105.00	210.00
Plancha de fibra de carbono 400x250x5	1	93.00	93.00
Mecanizado piezas de Fibra de carbono	1	50.00	50.00
DIN 125 - A 2.2	116	0.10	11.60
DIN 125 - A 3.2	40	0.12	4.80
DIN 125 - A 4.3	8	0.14	1.12
DIN 439 - M3.5	2	0.12	0.24
DIN 84 - M3 x 12	4	0.20	0.80
ISO 1207 - M2 x 12	18	0.20	3.60
ISO 1207 - M2 x 6	6	0.16	0.96
ISO 1207 - M2 x 8	34	0.18	6.12
ISO 1207 - M3 x 10	4	0.21	0.84
ISO 1207 - M3 x 12	8	0.22	1.76
ISO 1207 - M3 x 14	2	0.23	0.46
ISO 1207 - M3 x 20	4	0.26	1.04
ISO 1207 - M3 x 8	4	0.17	0.68
ISO 1207 - M3.5 x 10	2	0.22	0.44
ISO 1207 - M4 x 14	4	0.30	1.20
ISO 4032 - M3	4	0.10	0.40

ISO 4036 - M2	58	0.10	5.80
ISO 4036 - M3	22	0.10	2.20
ISO 4036 - M4	4	0.10	0.40
ISO 7045 - M3 x 12 - 4.8 - Z	6	0.24	1.44
ISO 7045 - M4 x 12 - 4.8 - Z	4	0.28	1.12
ISO 7045 - M4 x 35 - 4.8 - Z	24	0.30	7.20
ISO 7045 - M6 x 45 - 4.8 - Z	12	0.35	4.20
ISO 7089 - 3 - 140 HV	12	0.20	2.40
ISO 7089 - 4 - 140 HV	56	0.24	13.44
ISO 7089 - 6 - 140 HV	24	0.26	6.24
Nut GB/T 6172.2-2000 M3	6	0.15	0.90
Nut GB/T 6172.2-2000 M4	28	0.17	4.76
Nut GB/T 6172.2-2000 M6	12	0.19	2.28
Acople abajo Pixhawk	4	22.95	91.80
Acople arriba Pixhawk	1	22.95	22.95
Acople batería frontal	4	22.95	91.80
Acople batería lateral	2	22.95	45.90
Acople cámara profundidad	1	22.95	22.95
Acople cámara térmica	1	22.95	22.95
Acople GPS	1	22.95	22.95
Cubre cámara térmica	1	22.95	22.95
Cubre cámara profundidad	1	22.95	22.95
Montura cámara abajo	2	22.95	45.90
Montura cámara arriba	2	22.95	45.90

Montura motor	6	22.95	137.70
Tapa	1	161.03	161.03
			<b>1,337.17</b>

### 5.3 Ingeniería

En la siguiente tabla se mostrarán los costos para el diseño y la construcción del sistema.

Tabla 5.25 Costos de ingeniería. Fuente: Elaboración Propia.

Descripción	Meses	P. Mensual (\$)	P. Total (\$)
Alquiler laboratorio	4	500.00	2,000.00
Ingeniero Mecánico para el diseño y la construcción de la parte mecánica	4	800.00	3,200.00
Ingeniero Electrónico para el diseño y la conexión de los componentes electrónicos	4	800.00	3,200.00
Ingeniero Mecatrónica para el diseño y el acople de la parte mecánica, electrónica y control.	4	800.00	3,200.00
Ingeniero Industrial para la gestión del proyecto	4	800.00	3,200.00
			<b>14,800.00</b>

### 5.4 Costos Generales

En la siguiente tabla se mostrará el costo total para el desarrollo del sistema, sin considerar los costos de fabricación.

Tabla 5.4 Costos generales . Fuente: Elaboración Propia.

Componente	Cantidad	P. unitario (\$)	P. Total (\$)
Electrónicos	1	11,647.41	11,647.41
Mecánicos	1	1,337.17	1,337.17
Ingeniería	1	19,500.00	14,800.00
			<b>27,784.58</b>

## CONCLUSIONES

- Se logró diseñar un sistema para llevar a cabo la inspección de líneas eléctricas autónomamente a una distancia segura de estas, recorriéndolas hasta por 12.384 km (véase el cálculo en el Anexo 2). Además, se ha conseguido contar con un sistema que apoyaría a realizar un mantenimiento predictivo más rápido (comparado con los métodos convencionales). Esto se debe a que se ha desarrollado un algoritmo que le permitiría al sistema inspeccionar líneas y seguirlas simultáneamente mientras viaja a 30km/h, no superando los 55km/h de restricción.
- Los componentes seleccionados le darían la capacidad al UAV de recibir y transmitir datos a una computadora externa (puerto ethernet), almacenar datos (kit de desarrollo de software), ubicarse en todo momento (GPS), realizar el procesamiento de las imágenes de profundidad y termográfica (kit de desarrollo de software), y tener un vuelo estable (controlador de vuelo).
- Se han diseñado componentes mecánicos que a pesar de ser ligeros, resistirían satisfactoriamente las fuerzas que se ejercen sobre estos (véase simulaciones y cálculos en Anexo 3). Para lograr esto se utilizó materiales de baja densidad pero de gran resistencia como la fibra de carbono y el policarbonato.
- Se ha logrado simplificar y a la vez desarrollar una propuesta más económica (costo total de \$27,784.58) para el mantenimiento predictivo en líneas de alta y media tensión. Lo anterior debido a que, mediante el uso de este sistema, ya no se precisan de helicópteros o vehículos todo terreno para llegar a terrenos de difícil acceso, o la contratación de mano de obra especializada para cada vez que se precise realizar un mantenimiento predictivo.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] BANCO MUNDIAL  
2012 “Acceso a la electricidad (% de población)”  
< <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS> >  
Consulta: 9/03/2016
- [2] MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS  
2014 “Anuario Estadístico de Electricidad 2014 – Capítulo I”  
<<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/BALANCE%20E%20INDICADORES%202014.pdf>>  
Consulta: 9/03/2016
- [3] MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS  
2014 “Anuario Estadístico de Electricidad 2014 – Capítulo IV”  
<<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Capitulo%204%20Transmision2014.pdf>>  
Consulta: 9/03/2016
- [4] COMITÉ DE OPERACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL  
2010 “Aprueban la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos”  
<<http://www.coes.org.pe/dataweb3/2010/djr/baselegal/Norma%20Tecnica%20de%20Calidad%20de%20los%20Servicios%20Electricos.pdf>>  
Consulta: 9/03/2016
- [5] SISTEMAS FLIR  
2011 “Guía de termografía para mantenimiento predictivo”  
<[http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264\\_ES.pdf](http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_ES.pdf)>  
Consulta: 9/03/2016
- [6] SISTEMAS FLIR  
2015 “Quark 2 Uncooled Cores”  
< <http://www.flir.com/cores/display/?id=51266>>  
Consulta: 23/03/2016
- [7] MULTIROTOR  
2012 “Thermography”  
<<https://www.service-drone.com/en/applications/thermography>>  
Consulta: 9/03/2016

- [8] MULTIROTOR  
2014 “MULTIROTOR G4 Surveying-Robot”  
<<https://www.service-drone.com/en/products/surveying-robot>>  
Consulta: 24/03/2016
- [9] DSLRPROS  
“2014 Nighthawk Thermal P2 Aerial Kit”  
<<http://www.dslrpros.com/dslrpros-products/thermal-aerial-drone-kit.html>>  
Consulta: 9/03/2016
- [10] SERVICE-DRONE  
2014 “PHANTOM 2SPECS”  
<[http://www.scorpiondrones.com/index.php?route=product/product&product\\_id=714](http://www.scorpiondrones.com/index.php?route=product/product&product_id=714)>  
Consulta: 29/03/2016
- [11] HAL  
2010 “Design and Validation of a Mobile Robot for Power Line Inspection and Maintenance”  
< <https://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00194717/document> >  
Consulta: 9/03/2016
- [12] IEEE  
2015 “Development of an Autonomous Helicopter for Aerial Powerline Inspections”  
< <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5624432>>  
Consulta: 12/04/2016
- [13] SISTEMAS FLIR  
“2014 FLIR QUARK 2”  
< [http://cvs.flir.com/l/6132/2015-01-19/ypvyw/6132/119382/Quark\\_2\\_Datasheet\\_Update\\_112114.pdf?\\_ga=1.266179791.1972061305.1457388636](http://cvs.flir.com/l/6132/2015-01-19/ypvyw/6132/119382/Quark_2_Datasheet_Update_112114.pdf?_ga=1.266179791.1972061305.1457388636)>  
Consulta: 29/03/2016
- [14] OPTRIS  
2014 “INFRARED CAMERAS”  
< [http://www.optris.com/infrared-cameras?file=tl\\_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/P I\\_Brochure.pdf.>](http://www.optris.com/infrared-cameras?file=tl_files/pdf/Downloads/Infrared%20Cameras/P I_Brochure.pdf.>)  
Consulta: 29/03/2016
- [15] DAYCOR  
2014 “DayCor® ROMpact”

- < <http://www.ofilsystems.com/catalog/downloads/ROMpact300i.zip>>  
Consulta: 29/03/2016
- [16] DAYCOR  
2014 “Corona Cameras -DayCor® Family of Products Caméras multispectrale”  
< <http://www.daycor.com>>  
Consulta: 05/04/2016
- [17] DAYCOR  
2014 “DayCor® Swift”  
< <http://www.ofilsystems.com/catalog/downloads/swift.zip> >  
Consulta: 29/03/2016
- [18] STEREO LABS  
2014 “Zed”  
< [https://www.stereolabs.com/zed/docs/ZED\\_Datasheet\\_2016.pdf](https://www.stereolabs.com/zed/docs/ZED_Datasheet_2016.pdf)>  
Consulta: 29/03/2016
- [19] STEREO LABS  
2015 “ZED SDK - Depth Viewer”  
< <https://www.youtube.com/watch?v=P-QEnnMHYt0> >  
Consulta: 05/04/2016
- [20] ORBBEC  
2014 “Orbbec Astra Pro”  
< <https://orbbec3d.com/product-astra-pro/>>  
Consulta: 05/04/2016
- [21] ORBBEC 3D  
2015 “Orbbec Astra Depth Map HD”  
< [https://www.youtube.com/watch?v=HnarU\\_wLFRQ](https://www.youtube.com/watch?v=HnarU_wLFRQ) >  
Consulta: 05/04/2016
- [22] AITUR GROUP LTD.  
2015 “Infrared thermal imaging inspection of electrical transmission and distribution power lines”  
< <http://www.aiturgroup.com/infrared-thermal-imaging-inspection-electrical-transmission-and-distribution-power-lines>>  
Consulta: 20/06/2016
- [23] PDG HELICOPTERS  
2015 “Thermal imaging”

- < <http://www.pdghelicopters.com/thermal-image-patrols.html>  
>  
Consulta: 20/06/2016
- [24] ELECTRICAL 4 U  
2015  
“Corona effect in power system”  
< <http://www.electrical4u.com/corona-effect-in-power-system/> >  
Consulta: 20/06/2016
- [25] BUILT DRONES  
2015  
“Pulse LiPo 22'000 mAh 6S1P 22.2V 25C”  
< <http://www.built drones.com/pulse-lipo-22-000mah-6s1p-22-2v-25c/> >  
Consulta: 20/06/2016
- [26] ATTOPILOT  
2015  
“Compact DC voltage and current sense PCB with Analog Output”  
<<http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Current/DC%20Voltage%20and%20Current%20Sense%20PCB%20with%20Analog%20Output.pdf> >  
Consulta: 21/06/2016
- [27] RC UNIVERSE  
2015  
“Storing Lithium for longevity”  
< [http://www.rcuniverse.com/magazine/article\\_display.cfm?article\\_id=1183](http://www.rcuniverse.com/magazine/article_display.cfm?article_id=1183) >  
Consulta: 21/06/2016
- [28] HOBBYKING  
2015  
“UBEC DUO 4A/5~12V & 4A/5V”  
< [http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_\\_86591\\_\\_UBEC\\_DUO\\_4A\\_5\\_12V\\_4A\\_5V.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__86591__UBEC_DUO_4A_5_12V_4A_5V.html) >  
Consulta: 21/06/2016
- [29] PIXHAWK  
2015  
“Pixhawk Autopilot”  
< <https://pixhawk.org/modules/pixhawk> >  
Consulta: 21/06/2016
- [30] NVIDIA  
2015  
“Kit de desarrollo NVIDIA Jetson TX1”  
< <http://www.nvidia.es/object/jetson-tx1-dev-kit-es.html> >  
Consulta: 21/06/2016
- [31] NVIDIA

- 2015 “NVIDIA® Jetson™ TX1 Supercomputer-on-Module Drives Next Wave of Autonomous Machines”  
< <https://devblogs.nvidia.com/parallelforall/nvidia-jetson-tx1-supercomputer-on-module-drives-next-wave-of-autonomous-machines/> >  
Consulta: 21/06/2016
- [32] HOBBYKING  
2015 “DYS 40Amp Mini Opto BLHeli Multi-Rotor Electronic Speed Controller (BLHeli Firmware) SN40A”  
< [http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_81796\\_DYS\\_40Amp\\_Mini\\_Opto\\_BLHeli\\_Multi\\_Rotor\\_Electronic\\_Speed\\_Controller\\_BLHeli\\_Firmware\\_SN40A.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_81796_DYS_40Amp_Mini_Opto_BLHeli_Multi_Rotor_Electronic_Speed_Controller_BLHeli_Firmware_SN40A.html) >  
Consulta: 21/06/2016
- [33] 3DR  
2015 “3DR uBlox GPS with Compass Kit”  
< <https://store.3dr.com/products/3dr-gps-ublox-with-compass> >  
Consulta: 21/06/2016
- [34] UBLOX  
2015 “LEA-6 u-blox 6 GPS Modules”  
< [https://www.ublox.com/sites/default/files/products/documents/LEA-6\\_DataSheet\\_\(GPS.G6-HW-09004\).pdf](https://www.ublox.com/sites/default/files/products/documents/LEA-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09004).pdf) >  
Consulta: 21/06/2016
- [34] TIGUER MOTOR  
2015 “MN5208”  
< [http://www.rctigermotor.com/html/2015/Navigator\\_0206/286.html](http://www.rctigermotor.com/html/2015/Navigator_0206/286.html) >  
Consulta: 21/06/2016
- [35] LEARN ENGINEERING  
2014 “DC Motor, How it works?”  
< [https://www.youtube.com/results?search\\_query=brushed+dc+motor](https://www.youtube.com/results?search_query=brushed+dc+motor) >  
Consulta: 21/06/2016
- [36] LEARN ENGINEERING  
2014 “Brushless DC Motor, How it works ?”  
< <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac> >  
Consulta: 21/06/2016
- [37] MEJZLIK MODELLBAU

- 2010 “P16x5.4 Prop-2PCS/PAIR”  
< <http://store-en.tmotor.com/goods.php?id=382> >  
Consulta: 05/03/2018
- [38] AMAZON  
2010 “DJI Phantom 3 Vibration Absorbing Rubber Ball Part40”  
< [https://www.amazon.com/DJI-Phantom-Vibration-Absorbing-Rubber/dp/B00YYCMQT8/179-1008911-1773353?ie=UTF8&\\*Version\\*=1&\\*entries\\*=0](https://www.amazon.com/DJI-Phantom-Vibration-Absorbing-Rubber/dp/B00YYCMQT8/179-1008911-1773353?ie=UTF8&*Version*=1&*entries*=0) >  
Consulta: 21/06/2016
- [39] ALIEXPRESS  
2010 “<http://www.aliexpress.com/item/20pcs-60mmx40mm-3M-9448A-White-Double-Sided-EVA-Foam-Tape-Pad-Mounting-Tape-Auto-Car-Decorative/32595570194.html?spm=2114.40010508.4.18.qtoQhf>”  
< <http://www.aliexpress.com/item/20pcs-60mmx40mm-3M-9448A-White-Double-Sided-EVA-Foam-Tape-Pad-Mounting-Tape-Auto-Car-Decorative/32595570194.html?spm=2114.40010508.4.18.qtoQhf>>  
Consulta: 21/06/2016
- [39] ARDUPILOT  
2010 “Vibration Damping”  
< <http://ardupilot.org/copter/docs/common-vibration-damping.html> >  
Consulta: 21/06/2016
- [40] IEEE  
2011 “Learning to Extract Focused Objects from Low DOF Images”  
< <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5733401> >  
Consulta: 21/06/2016
- [42] INFRARED TRAINING CENTER  
2016 “Punto caliente rotula cadena de aisladores”.  
< <http://www.infraredtraining.com/community/boards/thread/10515/> >  
Consulta: 21/06/2016
- [42] AERO TOOLS

- 2016 “CURSO DE TERMOGRAFÍA APLICADA MEDIANTE EL USO DE DRONES (RPAS)”.  
< <http://atoolsuav.weebly.com/curso-termografiacutea.html> >  
Consulta: 21/06/2016
- [43] NETA WORLD  
2009 “Reference Tables”. *STANDARD FOR ACCEPTANCE TESTING SPECIFICATIONS for Electrical Power Equipment and Systems*. Portage, pp 227.  
< <http://www.iemworldwide.com/pdf/ansi-neta-ats-2009.pdf> >  
>  
Consulta: 21/06/2016
- [44] NETA WORLD  
2009 “AutoTune”.  
< <http://ardupilot.org/copter/docs/autotune.html> >  
Consulta: 16/09/2017
- [45] ARDUPILOT  
2009 “NVidia TX1 as a Companion Computer”.  
< <http://ardupilot.org/dev/docs/companion-computer-nvidia-tx1.html> >  
Consulta: 20/06/2018
- [46] MAVLINK  
2009 “MAVLink Developer Guide”.  
< <https://mavlink.io/en/> >  
Consulta: 20/06/2018