



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

PROYECTO FINAL DE GRADO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TERMODRON 2

DRON AUTÓNOMO DE RECONOCIMIENTO POR TERMOGRAFÍA

Autores:

Magdalena Mendivil

Rodrigo de Soto

Federico Díaz

Tutor:

Ing. Rafael Canetti

22 de julio de 2019

AGRADECIMIENTOS

A nuestro tutor, Rafael Canetti, por el apoyo y los conocimientos compartidos.

A Maite Gil Prandi y Florencia Vega, por ser nuestros pilares y brindarnos apoyo de forma incondicional.

Al Ing. Gonzalo de Soto, Raúl Díaz, Martín Echevarría, Julio Ceriliano, Fabian Batista y Matías Iglesias, por sus aportes a este proyecto desde su posición, nuestro agradecimiento.

Al grupo Termodron 1, por los consejos y el apoyo brindado.

A nuestros familiares, amigos y compañeros de trabajo que nos apoyaron constantemente durante este proceso, estando siempre a disposición aunque sea simplemente para proveernos palabras de aliento.

A Fida Newaj por cedernos su tesis y atender amablemente cualquier consulta.

El objetivo de este proyecto es continuar con el desarrollo de un sistema autónomo de detección de focos de calor mediante termografía, originalmente implementado por el grupo Termodron 1. El sistema consiste de dos unidades principales, el dron, y la estación de monitoreo y control. Los mismos se comunican en tiempo real entre sí, reportando su estado actual y enviando información relevante al usuario mediante una conexión a Internet.

Los cambios y mejoras realizadas al sistema surgen de la evaluación de lo implementado por Termodron 1 y de la necesidad de implementar nuevas funcionalidades. En primer lugar, se rediseña la estación de monitoreo y control, cambiando su implementación de un Arduino a una Raspberry PI 3. Esto genera mejoras en los tiempos de respuesta y conexión a Internet, ya que permite la ejecución de tareas en forma paralela. Se implementa también una plataforma de comunicación en tiempo real con el usuario, lo que permite un mayor control sobre la misión y recepción de información. Para lograr un sistema más estable y robusto, se reemplazan componentes y agregan nuevos, como ser motores y antenas de telemetría. Además, se realiza la implementación de un sistema de recarga inalámbrico autónomo, logrando recargar la batería del dron de forma automática. Esto lleva a su vez al diseño de una base y un sistema de acople automático. También se mejora el algoritmo de evasión de obstáculos, logrando evadir obstáculos ubicados a 2 m de distancia del dron sin depender del GPS. Por último y no menor, se diseña un algoritmo para el aterrizaje preciso y se realiza la caracterización de varios sistemas para lograr dicho objetivo. Con los cambios y mejoras implementadas, se logra un producto que funciona de la siguiente manera:

Cuando un usuario quiere definir la misión que debe cumplir el dron, él mismo puede configurar las características de la misma, en tiempo real, mediante el acceso a un servidor web. Entre las características de la misión configurables por el usuario se encuentran tanto las coordenadas geográficas a ser recorridas por el dron como las preferencias de la información a ser enviada al usuario por mail. Una vez que la estación de monitoreo recibe la misión, evalúa si es válida y realiza las funciones necesarias para que el dron la ejecute. En caso de ser una misión válida, el dron vuela por las coordenadas especificadas por el usuario relevando puntos calientes, con la capacidad de evadir obstáculos en su trayecto y finalizando la misión cuando se hayan recorrido todos los puntos especificados por el usuario. El estado del dron y toda la información adquirida durante la misión es reportada en tiempo real al usuario, tanto por mail como por el servidor web. Una vez finalizada la misión, el dron vuelve a la estación de monitoreo, donde

si es necesario, recarga su batería. La recarga es implementada mediante el diseño un sistema inalámbrico de transmisión de energía, y se ejecuta una vez que el dron reporta un aterrizaje exitoso sobre la estación. Una vez que el dron se recarga por completo, el mismo queda en espera de una nueva misión.

1. Introducción	11
2. Glosario	15
3. Descripción del sistema implementado (Termodron 2)	17
3.1. Recarga autónoma	19
3.2. Dron	20
3.2.1. Control de Vuelo	21
3.2.2. Evasión de obstáculos	21
3.2.3. Detección de focos de calor	22
3.2.4. Sistema de comunicación: Dron-Estación de Control	23
3.2.5. Recarga autónoma	23
3.3. Estación de monitoreo y control	25
3.3.1. Control de misión y comunicación con el usuario	26
3.3.2. Corrección diferencial	27
3.3.3. Comunicación con OnBoard	27
3.3.4. Control de la recarga	28
3.4. Mejoras implementadas	29
4. Análisis del sistema previo (Termodron 1)	31
4.1. Evaluación	31
4.1.1. Simulación de vuelo	31
4.1.2. OnBoard	32
4.1.3. GCS	32
4.1.4. Vuelo	33
4.1.5. Estado de la batería	34
4.2. Mejoras	35
5. Recarga autónoma	37
5.1. Diseño	37
5.1.1. Elección del tipo de recarga	37
5.1.2. Formas de recarga inalámbrica	38

5.1.3.	Sistema de recarga a implementar	39
5.2.	Elección de componentes	40
5.2.1.	Sistema de transferencia de energía	40
5.2.2.	Regulador de voltaje	41
5.2.3.	Cargador	42
5.2.4.	Batería	42
5.3.	Evaluación e implementación del sistema de transferencia de energía	43
5.3.1.	Conceptos generales	43
5.3.2.	Evaluación del diseño	44
5.3.3.	Implementación de los módulos TX/RX	47
5.4.	Armado del sistema de recarga	56
5.4.1.	Reguladores de voltaje	57
5.4.2.	Cargadores	58
5.5.	Testeo y análisis de resultados	58
5.5.1.	Testeo del sistema de transferencia de energía (TX/RX)	59
5.5.2.	Testeo del sistema TX/RX con el regulador	61
5.5.3.	Testeo del sistema TX/RX con regulador, cargador y batería	63
6.	Dron	65
6.1.	Hardware	66
6.1.1.	Controlador de vuelo	68
6.1.2.	OnBoard	69
6.1.3.	Antenas de telemetría	70
6.1.4.	GPS	71
6.1.5.	Radio	71
6.1.6.	Motores, hélices y ESCs	71
6.1.7.	Gimbal	72
6.1.8.	Sensores de distancia	73
6.1.9.	Cámara infrarroja y Shield SD	73
6.1.10.	Batería, reguladores y distribuidor	74
6.2.	Software	75
6.2.1.	Control de vuelo	75
6.2.2.	Sistemas de comunicación	75
6.2.3.	Estados	76
6.3.	Armado final del sistema	79
7.	Estación de Monitoreo y Control	83
7.1.	Hardware	84
7.1.1.	Raspberry PI	85
7.1.2.	Antenas de telemetría	86
7.1.3.	Sensor inductivo	86
7.1.4.	Motor stepper	86
7.1.5.	Sistema de recarga	87
7.2.	Software	87
7.2.1.	Comunicación con el Dron - Thread Dron	88
7.2.2.	Control de la base física - Thread Base	89
7.2.3.	Comunicación con el usuario - Thread AWS	90

7.2.4. Comunicación con la OnBoard - Thread On Board	91
7.2.5. GPS Diferencial - Thread GPS	92
7.3. Armado final del sistema	93
8. Pruebas	97
8.1. Evasión de obstáculos en misión	97
8.1.1. Simulación	97
8.1.2. Pruebas en campo	98
8.2. Sistema de recarga final	102
8.3. Sistema de comunicación	102
8.3.1. Comunicación Dron-Estación de Monitoreo	102
8.3.2. Comunicación Estación de Monitoreo - Usuario	104
8.4. Corrección diferencial de posición	105
8.5. Baliza de asistencia al aterrizaje	108
9. Puntos a seguir desarrollando	111
9.1. Agregado de otra cámara	111
9.2. Rediseño físico de la estación de control	111
9.3. Optimización de componentes y peso	112
9.4. Mejora en comunicación Dron-Estación	112
9.5. Mejora en sensores de distancia	113
9.6. Mejora del sistema de recarga	113
9.7. Paneles solares en la base	113
9.8. Recorrido de un área	113
10. Conclusiones	115
Anexos	117
Anexo A. Sistema previo	117
A.1. Descripción funcional	117
A.2. Descripción física	118
Anexo B. Estación de Control	123
B.1. Python y sus librerías	123
B.2. Descripción de la implementación de software	127
B.3. Corrección de posición global	131
B.4. Diseño de la baliza	133
Anexo C. Dron	149
C.1. Descripción de la implementación del software	149
Anexo D. Manual de Usuario	153
D.1. Descripción del producto	153
D.2. Funciones del dron	156
D.3. Funciones de la Estación de Monitoreo	158
D.4. Inicio del sistema y ejecución de misión	160
D.5. Calibración del dron	165

D.6. Especificaciones del producto 169

Antecedentes

El término vehículo aéreo no tripulado UAV (Unmanned Aerial Vehicle) se hizo común en los años 90 para describir a las aeronaves robóticas y reemplazó el término vehículo aéreo pilotado remotamente RPV (Remotely Piloted Vehicle). Ambos términos no son más que dos entre los muchos nombres que han recibido las aeronaves robóticas no tripuladas a lo largo de su existencia, la mayoría de ellos acuñados en el mundo militar. Un ejemplo de la variada oferta de estas aeronaves se observa en la figura 1.1. Desde la llamada “Teleautomaton” de Tesla (el primer torpedo de la historia), el “torpedo aéreo” de Sperry, ancestros de los actuales misiles de crucero; los blancos aéreos o “drones” (término derivado de la similitud de su sonido con el zángano), aeromodelos de recreo o modelos deportivos controlados por radio, hasta un amplio conjunto de nombres por medio de acrónimos, como RPV, SPA, UMA, UAV, UAS o el reciente RPAS, hay un amplio número de denominaciones para un mismo concepto.

La aviación no tripulada comparte sus orígenes con la aviación tripulada desde el momento en que los primeros pasos de los pioneros de esta última tuvieron como objetivo la construcción de pequeños modelos no tripulados a escala con el objetivo de mejorar los diseños tripulados. Pioneros como Cayley, Ninomiya, Du Temple, Langley o Cody crearon estas primeras aeronaves no tripuladas a lo largo de la primera mitad del siglo XIX y aunque a ninguno de ellos se le considera el verdadero creador de este concepto, todos ellos contemplaron el desarrollo inicial de la aviación no tripulada sirviendo como bancos de pruebas tecnológicos para el posterior desarrollo de modelos de mayor tamaño con piloto a bordo.

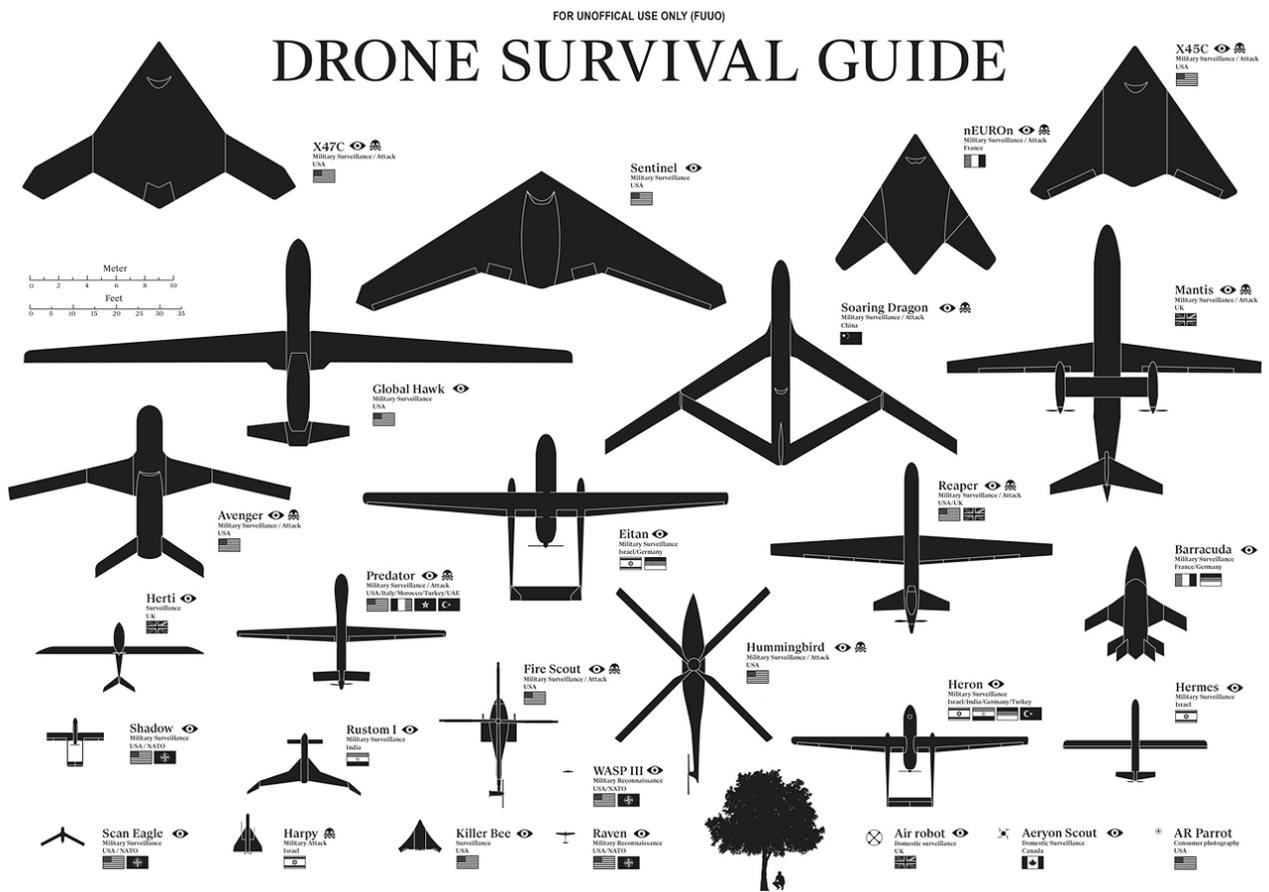


Figura 1.1: Ejemplos de UAV. Fuente de la imagen: [1]

Es posible clasificar los drones según el tipo de uso como militar y civil y dentro de este último se pueden clasificar como de uso comercial o privado. Dentro de las aplicaciones militares, son aprovechados para tareas tales como la detección y el seguimiento de buques, la protección portuaria, la inteligencia electrónica, la vigilancia marítima, la designación de objetivos y la detección y destrucción de minas terrestres.

En las aplicaciones comerciales se observa vasta variedad, pudiéndose apreciar en la agricultura (detección del nivel del agua y evapotranspiración en cultivos, mapeo y seguimiento del nivel de follaje en bosques, estudio de la salinidad y humedad de suelos), la fotografía y la cinematografía, etc. Ejemplos destacados son las grandes cadenas como Amazon o Aliexpress que se encuentran en proceso de instituir un servicio de entregas por medio de drones realizando una gran inversión en el rubro y generando cambios significativos en las legislaciones pertinentes. Todo este desarrollo tanto militar como comercial desemboca en un beneficio para el uso privado de drones, resultando en una industria pujante (con compañías dedicadas específicamente a la creación de hardware y al diseño de drones) con cada vez mayor disponibilidad de opciones para los usuarios a precios accesibles.

En el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República existe una línea de desarrollo e investigación que trabaja en UAVs denominada uQuad lleva desarrollados ya tres drones como proyectos de fin de carrera desde el año 2012

que, sumados al Termodron 1, aportan gran conocimiento en el área.

Objetivos

El proyecto que se plantea llevar a cabo en esta oportunidad consiste en implementar mejoras al proyecto Termodron 1 [2], con el fin de lograr un prototipo funcional, que logre la implementación de un sistema autónomo para el reconocimiento de puntos calientes mediante termografía.

Con el fin de extender la autonomía (potencialmente de meses de duración), aumentar la robustez del sistema y generar un control fino e instantáneo del dron, se mejoran componentes ya existentes y se introducen nuevos, definiendo así el alcance del proyecto. Con este fin se implementan las siguientes acciones:

- Mejorar la evasión obstáculos durante el vuelo para que no tenga dependencia con el GPS (Global Positioning System).
- Mejorar la recepción de corrección diferencial.
- Mejorar la respuesta en tiempo real de la estación de control.
- Cambiar componentes para que el dron pueda levantar más peso.
- Mejorar el sistema de comunicación entre el dron y la estación.
- Implementar un sistema de recarga autónomo para el dron.
- Implementar una base física de aterrizaje y recarga para el dron.
- Implementar un sistema de aterrizaje preciso para el dron.
- Implementar un sistema de comunicación en tiempo real con el usuario.

CAPÍTULO 2

GLOSARIO

GPS: Sistema de posicionamiento global.

DGNSS: Sistema diferencial de navegación por satélite.

UAV: Vehículo no tripulado.

RPV: Vehículo pilotado de forma remota.

AWS: Servicio web de Amazon.

IoT: Internet de las cosas.

OnBoard: Arduino DUE colocada sobre el dron, también llamada Computadora a bordo.

API: Interfaz de aplicaciones.

SDK: Herramientas para desarrollo de software.

RPI: Abreviación utilizada para nombrar a la Raspberry Pi Model 3B utilizada en este proyecto.

QGC: QGroundControl. Software de acceso libre para la conexión con la controladora de vuelo.

GCS: Sigla utilizada por Termodron 1 para nombrar a la base. En este proyecto pasa a llamarse Estación de Monitoreo y Control.

REGNAROU: Red Geodésica Nacional Activa de la República Oriental del Uruguay.

TCP: Protocolo de Control de Transmisión. Protocolo utilizado para establecer la conexión de la Estación con REGNAROU.

PWM: Modulación por ancho de pulsos.

ESC: Controlador electrónico de velocidad.

Thrust: Empuje vertical de dron.

TWR: Ratio peso-empuje del dron.

LiPo: Tipo de baterías de material Litio- olymero.

PCB: Placa de circuito impresa.

ESR: Resistencia serie equivalente.

AWG: Calibre estadounidense para un alambre.

HITL: Hardware In The Loop. Método para simular el software de la controladora de vuelo en la PC (no simula lectura de los sensores, sino que usa las lecturas reales).

SITL: Software In The Loop. Método que simula el hardware y software de la controladora de vuelo en la PC (incluido sensores como el GPS).

BEC: Circuito eliminador de la batería.

SBC: Single Board Computer.

IMU: Unidad de medida inercial.

MQTT: Protocolo ultraliviano de transporte de mensajes del tipo publicación/subscripción.

WGS84: World Geodetic System 1984.

AGC: Corrección automática de ganancia.

RAW: Expresión utilizada en este informe para referirse a los datos crudos proporcionados por la cámara térmica.

BMP: Formato de la imagen enviada al usuario.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA IMPLEMENTADO (TERMODRON 2)

El sistema final implementado en este proyecto se puede ver en la figura 3.1. El mismo contiene todos los componentes necesarios para establecer un vuelo con el dron, incluyendo todas las mejoras identificadas (ver capítulo 4) así como nuevas funcionalidades agregadas. Los componentes principales son el dron (cuadricóptero de vuelo autónomo) y la estación de monitoreo y control (base terrestre para el control de funciones del dron). Un esquema del sistema completo se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.1: Imagen del dron y la estación de monitoreo.

Con las mejoras mencionadas y los componentes agregados, se logra tener mayor autonomía del dron y más control por parte del usuario. El sistema implementado en este proyecto posee las siguientes características:

- Recarga autónoma completa de la batería¹ en 4 hs.
- Precisión de posición GPS de 2 m².
- Evasión de obstáculos ubicados en un rango de 2 m del dron.
- Detección de focos de calor en vuelo.
- Comunicación en tiempo real entre el usuario y el sistema (estado del dron, modo de vuelo, estado de batería, posición, etc.).
- Envío de fotos y estados del dron al usuario.

¹El tiempo de recarga depende del nivel de batería inicial. El tiempo evaluado es para un nivel de batería inicial de 11,4 V

²Distancia caracterizada de forma estática.

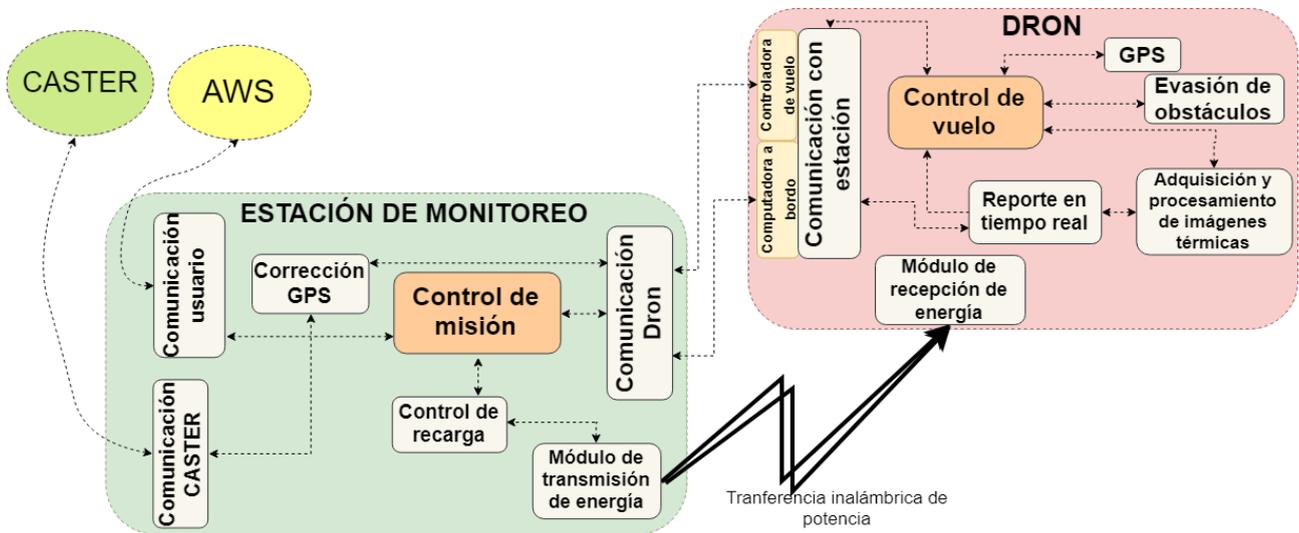


Figura 3.2: Diagrama esquemático del sistema implementado

A continuación se realiza una descripción general de los principales módulos que componen al sistema, éstos son: el dron, la estación de monitoreo y control y el sistema de recarga.

3.1. Recarga autónoma

El sistema de recarga implementado permite aumentar la autonomía del sistema total, pasando del orden de los minutos a ser potencialmente de meses, gracias a la capacidad de recargar la batería del dron automáticamente, permitiéndole realizar más de una misión por día.

El sistema de recarga es utilizado para recargar una batería LiPo de 5 Ah. Para implementar este sistema, se diseña la transferencia de energía, la cual es inalámbrica, y permite la recepción de 26 W en el dron con una eficiencia de 57%. Para poder realizar la recarga, al módulo de transferencia de energía se le conecta un regulador de voltaje y un cargador de baterías LiPo. Un esquema del sistema de recarga implementado se muestra en la figura 3.3.

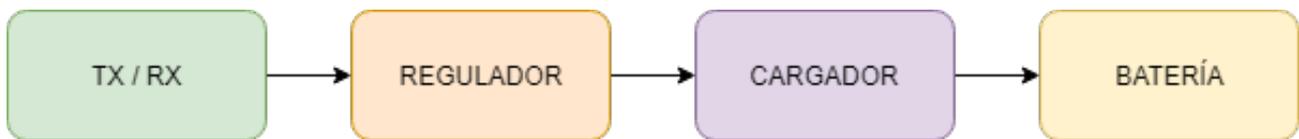


Figura 3.3: Esquema del sistema de recarga en el dron

Para la implementación del sistema de transferencia de energía, se utiliza un diseño externo (ver [3]), al cual se le realizan modificaciones para adecuarlo a las necesidades de este proyecto. Por otro lado, el regulador y el cargador son componentes disponibles en plaza, elegidos específicamente para lograr el menor tiempo de carga posible.

Para más detalles de la construcción y el testeado de este sistema, ver el capítulo 5.

3.2. Dron

El cuadricóptero contiene todos los componentes necesarios para realizar las siguientes funciones:

- Ejecución autónoma de la misión precargada.
- Evasión de obstáculos en vuelo.
- Obtención y procesamiento de imágenes térmicas para la detección de focos de calor.
- Recarga de la batería.
- Reporte en tiempo real de estado, fotos y logs de vuelo a la estación de monitoreo y control.

En la figura 3.4 se puede observar un esquema de capas del sistema. Se muestran los módulos de software utilizados para controlar al dron, así como los correspondientes componentes utilizados.

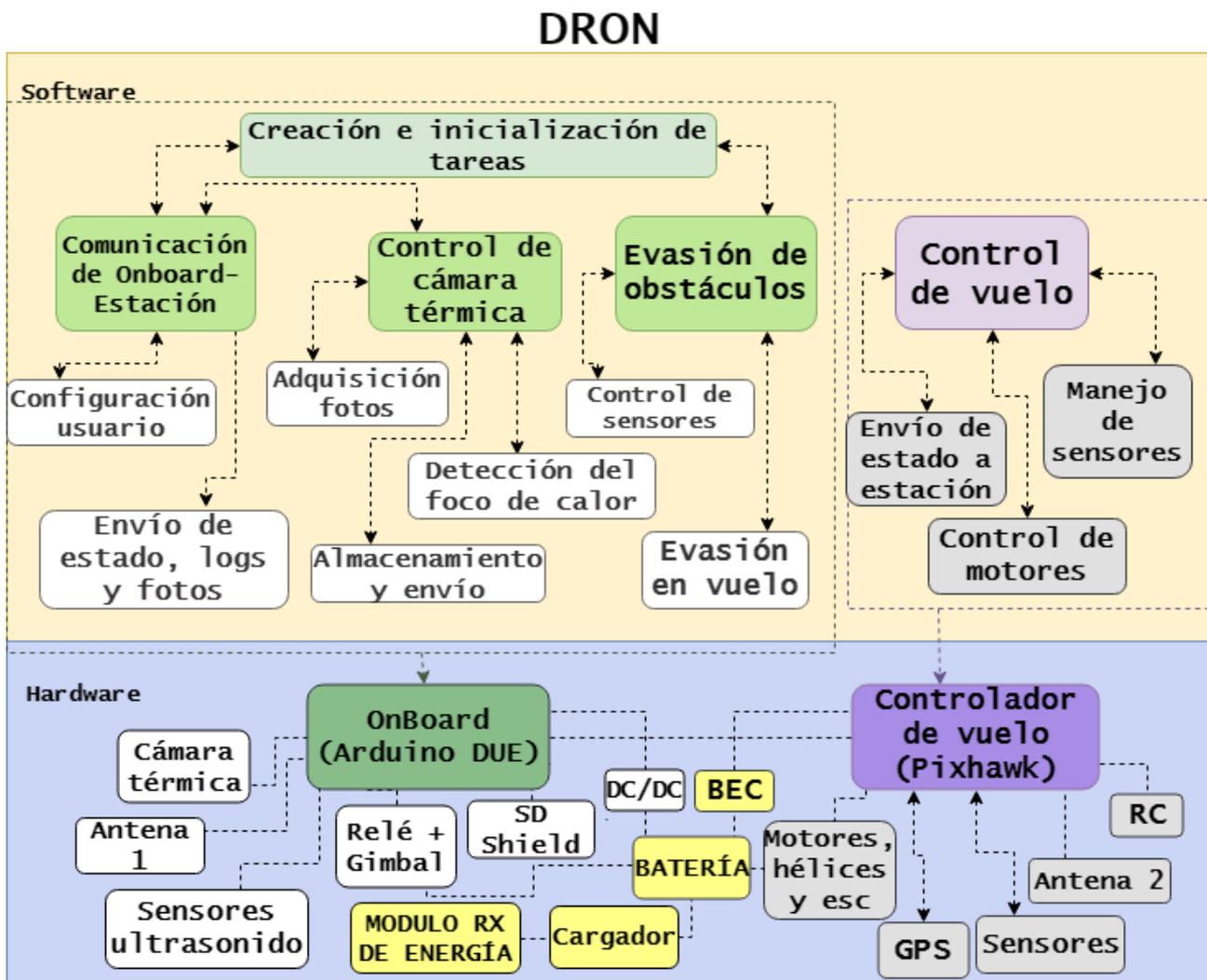


Figura 3.4: Diagrama de capas del dron.

El dron cuenta con dos microcontroladores independientes: el controlador de vuelo (Pixhawk) y la Computadora a bordo (OnBoard).

El controlador de vuelo utiliza firmware de Ardupilot mientras que la OnBoard se programa en lenguaje basado en C++. A continuación se realiza una breve descripción de las funciones realizadas por el dron. Para más detalle de cada función ver el capítulo 6.

3.2.1. Control de Vuelo

El control de vuelo es realizado por una controladora marca Pixhawk, la cual es una tarjeta integrada diseñada específicamente para controlar el vuelo de drones actuando como el cerebro del mismo. Tiene como función el control del sistema de motores usando un conjunto de sensores tanto internos como externos, y la recepción de comandos por medio de comunicación por telemetría. La controladora de vuelo dispone de algoritmos que controlan la altitud, posición y navegación de distintos tipos de drones multirrotores, como también de ala fija e incluso rovers. En este proyecto, se utiliza para controlar un cuadricóptero.

La placa controladora utilizada, así como los sensores y antenas son las mismas que las utilizadas en el proyecto de Termodron 1 y se detallan en el capítulo 6. Sin embargo, se realizan dos cambios importantes relacionados con el control de vuelo.

En primer lugar, se cambian los motores por unos con mayor empuje, para poder agregar mayor peso al sistema. En segundo lugar, se cambia el firmware de la controladora. Estos cambios aportan un mayor control en el movimiento del dron, lo que es imprescindible para poder realizar la evasión de obstáculos.

3.2.2. Evasión de obstáculos

La capacidad de evadir obstáculos es una parte crítica del sistema debido a la seguridad tanto de las personas como del dron. En este proyecto se mantiene el uso de sensores de ultrasonido implementado por Termodron 1 como fuente de información para desarrollar la evasión, pero se cambia el algoritmo de detección y control de forma drástica. En vez de setear nuevas coordenadas cada vez que se detecta un obstáculo, se controla el movimiento del dron por medio de la modificación de la velocidad de los motores.

Una vez en vuelo, el sistema sensa en forma continua para detectar objetos en la dirección de vuelo y cambiar el estado de misión a evasión. Esta acción es llevada a cabo por la OnBoard, la cual toma el control del vuelo mediante el cambio de modo del controlador de vuelo, y según la información que lee de los sensores, comanda movimientos simples como izquierda, derecha o atrás para evadir el objeto detectado. Una vez que el dron logra evadir el objeto, continúa la misión que se estaba ejecutando.

El hardware y la lógica utilizada para la evasión se pueden observar con más detalle en el capítulo 6.

3.2.3. Detección de focos de calor

La OnBoard lee tanto los sensores de distancia como la cámara térmica. Este segundo instrumento es fundamental para realizar el relevamiento de focos de calor en el área que recorre el dron.

La acción de relevamiento de focos de calor se realiza cada vez que el sistema no detecta objetos en su trayecto. Es entonces cuando el sistema toma una fotografía con la cámara térmica y ejecuta el algoritmo de detección de puntos calientes. Si un punto caliente es detectado, se notifica a la estación de monitoreo y se guarda la foto para su posterior envío.

El algoritmo de detección tiene fijados umbrales de intensidad para la imagen térmica, y lo que realiza es una revisión completa de la misma, notificando en el caso de encontrarse puntos comprendidos entre los umbrales de interés. En caso de encontrarse más de un cuerpo en dicho rango, se considera el de mayor cantidad de píxeles.

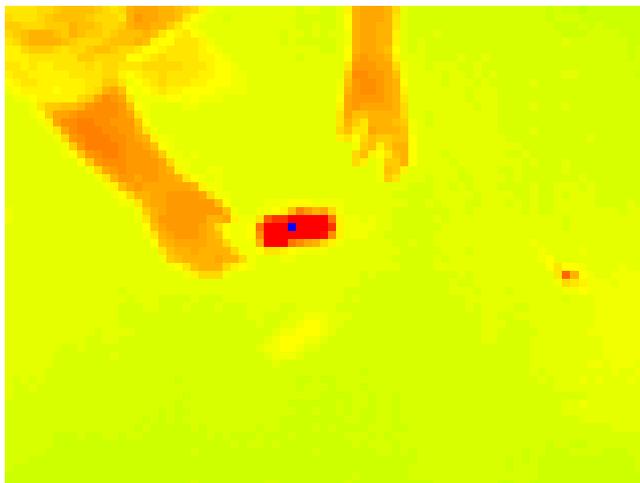


Figura 3.5: Ejemplo de detección en rango de interés

Se realizan modificaciones al algoritmo de Termodron 1 para corregir su funcionamiento en determinadas situaciones y adaptarlo a las necesidades de este proyecto. Luego de capturada la imagen, para su representación se utiliza una función heredada, que convierte los datos a una representación en falso color de dos colores (verde y rojo), para presentarlos al usuario.

Uno de los cambios implementados en este proyecto es la adición de una segunda función de almacenamiento de imagen, donde se setea en otro archivo una marca en azul (sobre la imagen anterior) correspondiente al centro aproximado del cuerpo de mayor tamaño dentro del rango de temperaturas donde se busca, ignorando así el resto de cuerpos en la figura que no son de interés. Un ejemplo de la nueva imagen se aprecia en la figura 3.5.

Además, se cambia el seteo de la cámara para que dos fotos sean comparables ya que en la configuración previa, la escala utilizada cambiaba acorde a la temperatura de la cámara.

3.2.4. Sistema de comunicación: Dron-Estación de Control

El sistema final de comunicación implementado en el dron se observa en la figura 3.6.

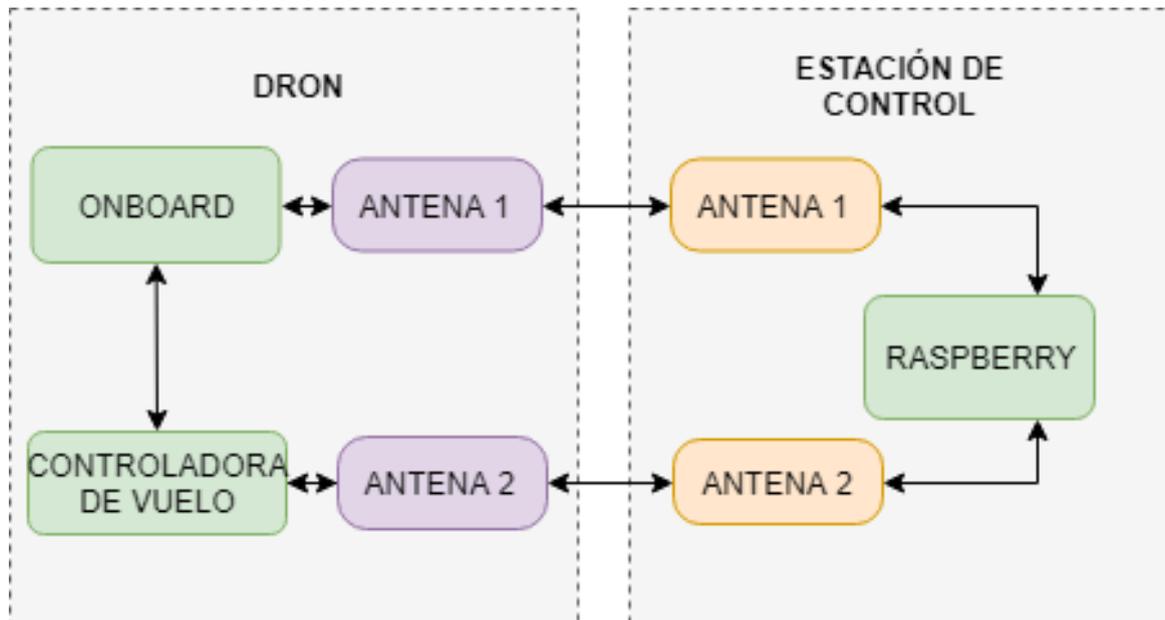


Figura 3.6: Esquema del sistema de comunicación del dron con la base

El sistema cuenta con dos vías de comunicación con la estación de control, lo que genera la posibilidad de comunicación y envío de datos durante el vuelo, como también genera redundancia en la comunicación en caso de falla.

En el caso de la comunicación con la OnBoardEstación de control, mediante la misma se realiza el envío de las imágenes obtenidas durante el vuelo y de estados del sistema en tiempo real.

Por otro lado, mediante el canal disponible entre la controladora de vuelo y la estación de control, se establece un control en tiempo real de la misión y comandos de emergencia como aterrizaje y retorno a la base.

Por último, la comunicación serial establecida entre la OnBoard y la controladora permite la ejecución de comandos relativos a la evasión de obstáculos.

3.2.5. Recarga autónoma

Como se menciona en la sección anterior, el sistema de recarga consta de varios componentes interconectados. Los componentes del sistema que se ubican sobre el dron son:

- Módulo de recepción de energía.
- Regulador de voltaje.
- Cargador de la batería.

Una vez energizado, el sistema de recepción de energía alimenta al cargador, el cual se enciende de forma automática y recarga la batería. De esta forma, el sistema de recarga es enteramente controlado por la estación de monitoreo. Para más detalle sobre el sistema de control implementado ir al capítulo 7.

Para la realización de todas las funcionalidades del dron descritas hasta este punto, se necesita de la interconexión de diversos componentes. Este conjunto de componentes y su conexión, se puede apreciar en la figura 3.7.

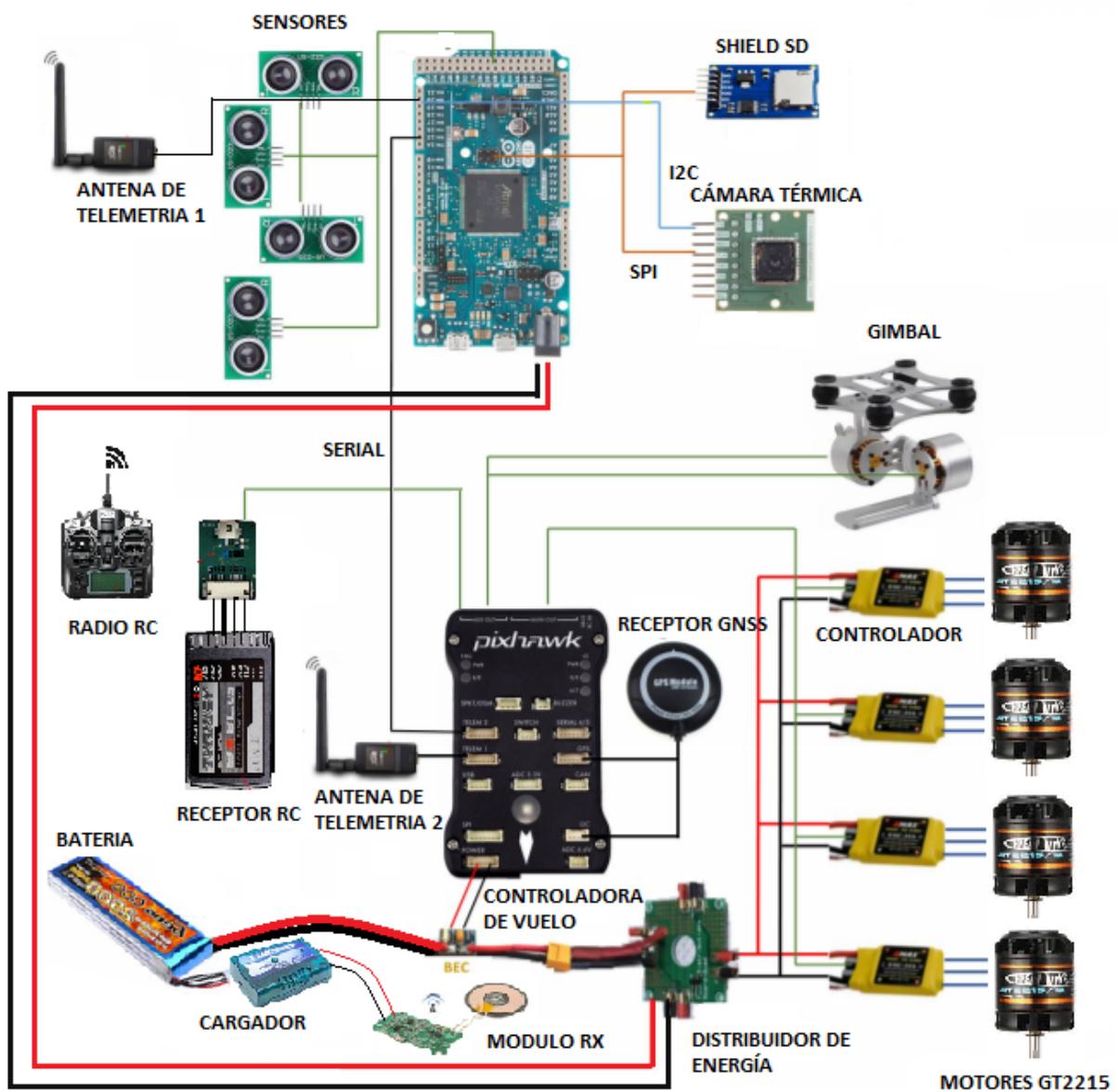


Figura 3.7: Esquema de conexión de componentes del dron.

3.3. Estación de monitoreo y control

La estación de monitoreo es la encargada de controlar la misión del dron así como realizar el reporte en tiempo real del sistema al usuario. Para lograr esto, la estación realiza las siguientes funciones:

- Se comunica con el controlador de vuelo para realizar actividades de monitoreo y control de misiones.
- Establece la comunicación con el usuario a partir de un dispositivo creado en AWS (Amazon Web Service) IoT (Internet of things), para el reporte de datos y configuración de parámetros. También dentro de la comunicación con el usuario realiza reportes por medio de correo electrónico para el envío de imágenes y logs.
- Genera una conexión con la estación de corrección GPS del Cerro, para la implementación de GPS diferencial del sistema. Realiza además el envío al controlador de vuelo de la información codificada para su interpretación.
- Se comunica con la OnBoard para el monitoreo del sistema, recepción de fotos en tiempo de vuelo e información general de vuelo una vez aterrizado.
- Controla el acople de bobinas, la recarga de la batería del dron y el funcionamiento de la base física.

En la figura 3.8 se muestra un esquema del sistema implementado en la estación. El software se divide en cinco grandes módulos encargados de las funciones principales. Estos módulos son independientes entre sí, por lo que la falla de uno no afecta a los demás.

ESTACIÓN DE MONITOREO Y CONTROL

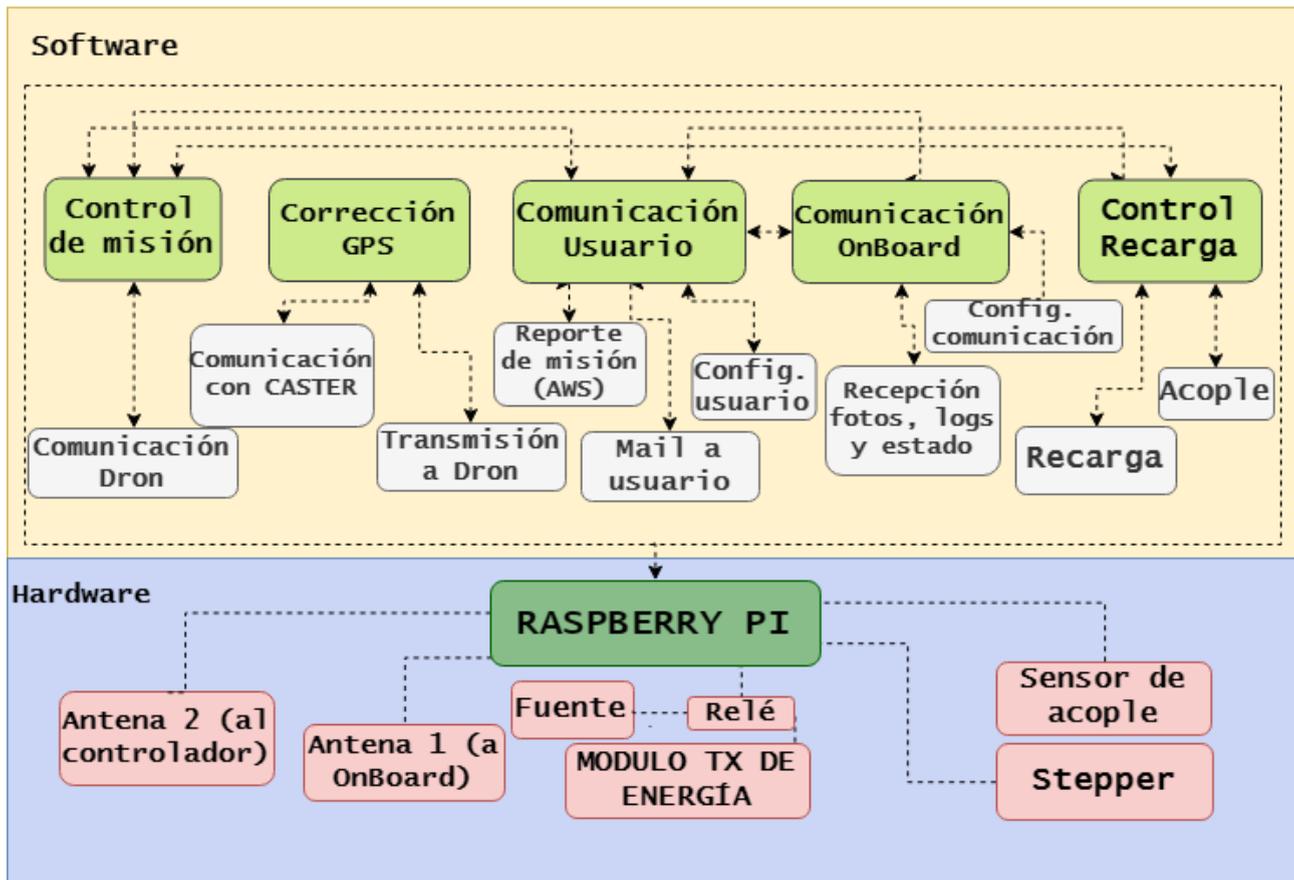


Figura 3.8: Diagrama de capas de la estación de monitoreo y control.

Los módulos de software son implementadas en lenguaje Python utilizando una Raspberry PI, la cual contiene los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema. Las principales librerías de Python utilizadas son:

- Dronekit-Python que es una API (Application Programming Interface) orientada a la comunicación de UAVs, tanto computadoras a bordo como estaciones de monitoreo, totalmente basada en Mavlink.
- AWS IoT Device por su parte es un SDK (Software Development Kit) que conecta el script de Python con el servidor de AWS donde el usuario puede recibir y modificar variables en tiempo de ejecución.

A continuación se realiza una breve descripción de las funciones realizadas por la estación. Para más detalle sobre estas funciones y los componentes, ver el capítulo 7.

3.3.1. Control de misión y comunicación con el usuario

El control de la misión es realizado por el usuario mediante la utilización del servicio AWS IoT. Este servicio brinda la posibilidad de generar una comunicación bidireccional entre la estación

de monitoreo y un servidor web para el reporte continuo del estado del sistema, donde los usuarios pueden tener la información instantánea del dron (por ejemplo: estado de batería, puntos recorridos, velocidad, posición, modo de vuelo, etc..) así como controlar algunas características de su funcionamiento, como ser:

- Coordinadas a ser recorridas.
- Aterrizaje de emergencia del dron.
- Retorno inmediato a la estación.
- Configuración de toma de fotos y envío de información por mail.

La conexión con la plataforma AWS se realiza mediante la conexión a internet de la RPI. Esta conexión es realizada de forma automática por la RPI luego de su encendido, y se realiza mediante una red WIFI.

La comunicación con el dron así como el seguimiento de la misión se realiza utilizando la librería de Python Dronekit.

Para la implementación de estos sistemas, se decide realizar módulos separados mediante la utilización de threads en Python. De esta forma se logra paralelizar las funciones logrando menores tiempos de respuesta.

3.3.2. Corrección diferencial

El DGPS (Differential Global Positioning System) [4] es una técnica para mejorar la precisión de la localización de un receptor usando datos desde una estación de referencia cercana (con posición conocida y fija). Dicha estación recibe la posición dada por el sistema GPS, y puede calcular los errores producidos por dicho sistema comparándola con la suya. A continuación transmite la corrección a los receptores, logrando así que estos se corrijan dentro del área de cobertura de transmisión de señales del equipo GPS de referencia. En el anexo B.3 se encuentra una descripción más detallada del funcionamiento en comparación con el GPS.

Para hacer uso de este servicio la estación de monitoreo se conecta a un servidor de datos conocido como cáster, el cual proporciona los datos de corrección. Luego estos datos son retransmitidos al dron para que la controladora de vuelo Pixhawk los reciba y corrija su posición.

3.3.3. Comunicación con OnBoard

Como se menciona en la sección 3.2.4, la estación de monitoreo tiene un canal totalmente dedicado a la comunicación con la OnBoard. En este caso se implementan tres puntos fundamentales:

- Recepción de fotos capturadas y almacenadas durante el vuelo (configurable por el usuario mediante AWS).
- Estado del sistema a bordo y watchdog de la comunicación para el control en tiempo real del sistema.

- Recepción del log del dron una vez finalizada la misión.

Con estas implementaciones se establece un sistema con flujo continuo de información, mejorando la aplicación sustancialmente.

3.3.4. Control de la recarga

El control de la recarga realizado por la estación de control consta de tres fases diferentes:

1. Acople de las bobinas.
2. Encendido del sistema de transferencia de energía.
3. Detección de carga completa y apagado del sistema de transmisión de energía.

Una vez que se detecta que el dron está en la estación, y que el nivel de batería no es suficiente para realizar un vuelo, se inicia la fase de acople de las bobinas. Para esto, se controla un motor en la base física que realiza el giro del dron. Luego, mediante el uso de un sensor inductivo, se detecta la posición donde se produce el acople de las bobinas y se detiene el giro del motor.

Posteriormente, las bobinas se suponen acopladas y se puede comenzar con la fase de recarga. Para esto, se comanda un relé que energiza el sistema de transmisión de energía.

Durante el proceso de recarga, se monitorea el nivel de batería del dron. Cuando se llega al nivel de batería deseado o el tiempo de recarga cumple el tiempo límite, se apaga el sistema de transmisión de energía.

Para la implementación de todas las funcionalidades de la estación se realiza la interconexión de distintos componentes. Un esquema del conexionado se muestra en la figura 3.9.

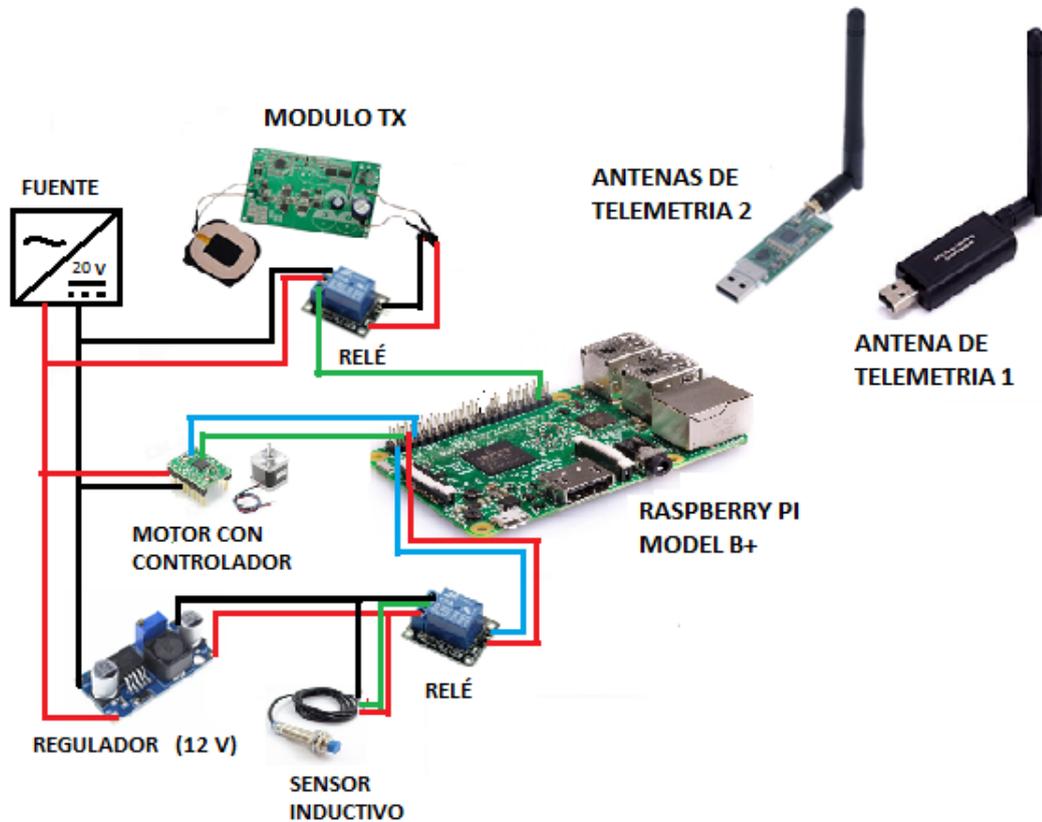


Figura 3.9: Esquema de componentes de la estación

3.4. Mejoras implementadas

A partir del análisis del proyecto implementado por Termotron 1 (ver capítulo 4), se identifican cuáles mejoras realizar. A modo de resumen, las mejoras y nuevas funcionalidades agregadas son las siguientes:

- Mejoras en la evasión obstáculos durante el vuelo para que no tenga dependencia con el GPS.
- Mejoras en la recepción de corrección diferencial.
- Mejoras en la respuesta en tiempo real de la estación.
- Cambio en componentes para que el dron pueda levantar más peso.
- Mejoras en la comunicación del dron con la estación.
- Mejoras el posicionamiento de la cámara respecto al dron.

Además, se propone la adición de las siguientes funcionalidades para de esta forma lograr un producto más autónomo y eficiente:

- Implementación de un sistema de recarga autónomo.
- Creación de una base física de aterrizaje y recarga.
- Implementación del aterrizaje preciso del dron.
- Implementación de la comunicación en tiempo real con el usuario.

La implementación en detalle de cada una de estas funcionalidades se describe en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DEL SISTEMA PREVIO (TERMODRON 1)

Para comenzar a trabajar en el proyecto, es necesario previamente, entender y evaluar el sistema diseñado por Termodron 1, para luego decidir posibles mejoras a implementar como también funcionalidades a reutilizar. A continuación se describen las pruebas y los resultados obtenidos.

4.1. Evaluación

A continuación se evalúa cada funcionalidad del sistema implementado por Termodron 1. Para una descripción general del sistema implementado en ese proyecto, ver el anexo A.

4.1.1. Simulación de vuelo

El firmware utilizado en Termodron 1 para la placa controladora del dron conforma un piloto automático y es llamado PX4. A partir de ese código es que se diseñan diferentes programas para poder simular e implementar el comportamiento del dron. De esta forma, estableciendo una conexión con el controlador (mediante USB), se puede realizar una simulación del sistema junto con sus sensores, sin poner en peligro la integridad del dron.

Para establecer la simulación, se utilizan los programas JMAVSim y QGroundControl. Para más detalle sobre este software ir a [2].

En la primer etapa de simulación se estudia la configuración del Pixhawk con el QGroundControl (QGC) y el JMAVSim, y la respuesta del sistema ante distintos cambios. Utilizando una PC con sistema operativo Ubuntu, se establece la conexión entre el controlador y la QGC (por telemetría) y JMAVSim (por USB). Esto permite el testeo de varias funcionalidades del Pixhawk (comandos básicos de movimiento, GPS, control remoto, etc).

En la segunda etapa, se cambia el programa QGC por la base desarrollada (GCS¹) y se mantiene la conexión al jMAVSim mediante USB. La GCS usa la misma forma de conexión por telemetría que el QGC. De esta forma, se evalúa la respuesta del controlador ante la comunicación con la GCS durante la simulación de vuelo. Algunas de las funcionalidades comprobadas son:

¹En este proyecto, la GCS pasa a ser la Estación de monitoreo y control.

- Recepción de información desde el controlador a la GCS.
- Ejecución de comandos de despegue y aterrizaje enviados al controlador desde la GCS.

4.1.2. OnBoard

El Arduino que oficia como placa OnBoard cumple funciones alternativas al controlador, tales como almacenar las imágenes desde la cámara térmica, enviar información a la GCS cuando se detecta un objeto con las condiciones específicas y tomar control del vuelo del dron en ciertas circunstancias. Para poder testear las funciones de la OnBoard, se simula un vuelo del dron con el JMAVSim. Los aspectos que se evalúan son:

- Cámara térmica y almacenamiento de imágenes.
- Envío de información a la GCS.
- Comunicación con el PixHawk.
- Evasión de obstáculos.

De la evaluación de las funcionalidades anteriores se comprueba el correcto funcionamiento de la cámara térmica, logrando que el dron detecte el punto caliente y almacene la foto. Esto implica que el algoritmo de detección, análisis y almacenamiento de las imágenes funciona correctamente.

Así mismo, se comprueba la recepción en la GCS de la foto almacenada en la OnBoard, lo que permite confirmar el correcto funcionamiento de esta comunicación.

Debido a la forma de implementación de la evasión de obstáculos realizada por Termodron 1, no se logra testear esta funcionalidad mediante la simulación.

A partir de esta última prueba, se nota que el sistema utiliza waypoints para setear la nueva dirección del dron, lo que hace a la evasión totalmente dependiente de la señal de GPS y no permite un control fino sobre la dirección a la que dirigir el dron.

4.1.3. GCS

Para testear la GCS, se establece la conexión a Internet para poder recibir comandos del usuario por mail. Luego, de la misma forma que en las pruebas anteriores, se simula un vuelo en el dron utilizando jMAVSim. Al mismo tiempo, se conecta la GCS a la PC para observar los datos recibidos. Las funcionalidades evaluadas en esta prueba son:

- Recepción periódica del estado de la PixHawk y datos OnBoard.
- Envío de comandos al dron.
- Recepción y envío de mails con el usuario.
- Conexión con el servidor DGNSS.

En primer lugar, se comprueba que tanto la recepción como el envío de información con el dron es efectiva. Lo mismo ocurre con la recepción de datos desde la OnBoard. Tanto las imágenes como datos generales del dron (altitud, posición, nivel de batería) se reciben correctamente en la GCS.

Una de las funciones más importantes de la GCS es la capacidad de comunicarse con el usuario. Esta función se realiza mediante un modulo GSM 3G ubicado en la GCS, que permite la conexión a Internet. Al evaluar este sistema se comprueba que la GCS es capaz de enviar y recibir mails, sin embargo se ve que la conexión a Internet es intermitente, y se pierde cada 30 segundos.

Finalmente, se comprueba la correcta recepción de la información DGNSS por parte de caster de corrección diferencial (REGNAROU (Red Geodésica Nacional Activa de la República Oriental del Uruguay)). Sin embargo, y como ya había sido indicado por el grupo de Termodron 1, para que el sistema funcione correctamente, es necesario apagar el shield 3G una vez finalizada la comunicación con el caster. Esto se debe a que no se encuentra la forma de terminar la comunicación TCP con el cáster, lo que impide al shield atender a la solicitud para recibir mails del usuario. Esta solución es ineficiente, dado que el shield demora 30 segundos en volver a iniciar.

4.1.4. Vuelo

La evaluación del sistema implementado por Termodron 1, tiene como objetivo final entender el sistema para poder volar el dron sin inconvenientes. Aunque la mayoría de las funcionalidades del mismo se comprueban mediante simulaciones, el hecho de que el dron vuele es el objetivo final.

Para poder evaluar este punto, se sigue el manual provisto por Termodron 1 para la ejecución del vuelo, que incluye calibración de sensores, conexión a la GCS, etc. A partir de esta prueba, no se logra realizar la ejecución de un vuelo. Las posibles causas por las que el dron puede presentar dificultades para volar son:

- PWM de los ESCs (Electronic Speed Controller) mal configuradas.
- Calibración de ESCs.
- Mala calibración de sensores del PixHawk.
- Sobrepeso del dron.

Para descartar la primer posible causa, se estudian los parámetros del controlador correspondiente a los motores. Estos parámetros corresponden al máximo y mínimo PWM que el controlador entrega a los ESCs. De esto se verifica que los valores están dentro del rango requerido (ver Tabla 4.1).

	Min	Max	Valor
PWM_MIN	800	1400	1072
PWM_MAX	1600	2000	1950

Tabla 4.1: Valores de PWM del PX4

Otra opción que influye en el vuelo es una incorrecta calibración de los ESCs, dado que puede provocar un desbalance en la energía hacia los motores. Este punto se descarta debido a que el problema se mantiene pese a la recalibración.

La última opción es que el dron pese más de lo que los motores pueden levantar. Según la hoja de datos de los motores [5], éstos pueden levantar 745 g cada uno, lo que genera un thrust (Se define como el empuje vertical del Dron) total de 2980 g.

Para que un UAV disponga de agilidad durante el vuelo, se recomienda que la relación entre el thrust y el peso (TWR²) sea mayor a 2. Esto provee una mayor estabilidad y la capacidad de mantenerse sobrevolando un área.

Para poder determinar el TWR, se pesa el dron, con lo que se obtiene que su peso es de 1890 g, implicando un TWR= 1,6, lo que está por debajo de la recomendación antes mencionada de que la relación entre el thrust y el peso sea mayor a 2. Aunque esta relación no es la ideal, el dron debería ser capaz de despegar.

Aunque la razón específica de por qué el dron no pudo despegar no se pudo determinar con certeza, a partir de estas pruebas se identifican mejoras a realizar, como el cambio de motores por unos con más empuje y la re-calibración constante de los sensores y ESCs del dron.

El análisis de las nuevas tecnologías y la elección de los nuevos motores se detalla en la sección 6.1.6.

4.1.5. Estado de la batería

Uno de los componentes más importantes del dron es la batería, ya que provee energía a todo el sistema. Éste dron cuenta con una batería LiPo de 3 celdas y 11,1 V de voltaje nominal. Puede entregar 5 Ah y soporta una descarga de 50 C.

Este tipo de baterías es el más utilizado en los UAV por ser las que tienen mejor relación peso/capacidad y tener nivel bajo de auto-descarga. Además, su vida útil se encuentra entre los 300-400 ciclos de carga/descarga.

La desventaja es que son altamente inflamables y si no se utilizan en condiciones apropiadas (menos de 50 °C, y voltaje mayor a 3,2 V por celda), corren riesgo de explotar.

Debido a los riesgos mencionados anteriormente, se evalúa la batería actual, ya que luego de un año de uso y otro año de almacenamiento, podría estar degradada. Para evaluar la batería se utiliza un cargador LiPo con balance de celdas, lo que permite detectar y corregir algún desbalance de voltaje entre las celdas. Al evaluar las celdas, se determina que la batería se encuentra correctamente balanceada, y que el voltaje se halla sobre el nivel deseado (mayor a 3,1 V por celda).

Un indicador de que la batería podría estar en malas condiciones es la resistencia interna (RI), la cual aumenta en caso de desgaste. Los rangos de aceptación usuales para baterías LiPo son:

²Thrust to Weight Ratio

- Excelente estado: RI entre 0-5 m Ω por celda.
- Aceptables: RI entre 5-10 m Ω por celda.
- Desgastadas: RI entre 10-20 m Ω por celda.
- Inutilizables: RI mayor a 20 m Ω por celda.

Al medir la resistencia de la batería ³, se obtuvo un valor de 10 m Ω por celda, lo que implicaría que la batería todavía es utilizable.

4.2. Mejoras

El análisis previo del sistema implementado por Termodron 1 provee la información necesaria para identificar un punto de partida en el desarrollo de mejoras y nuevas funcionalidades, previamente descritas en la sección 3.4.

Éste análisis, realizado de manera exhaustiva, se considera uno de los hitos importantes de este proyecto, debido a la importancia y dificultad que presupone la comprensión del sistema previo realizado por Termodron 1.

³La medida es realizada automáticamente por el cargador, con un error de 0.1 m Ω

En este capítulo se detalla el diseño, implementación y testeo del sistema de recarga autónoma. La implementación de este sistema permite al dron recargarse una vez aterrizado, sin la necesidad de intervención humana.

5.1. Diseño

El diseño del sistema consiste en la elección del tipo de recarga y su implementación.

5.1.1. Elección del tipo de recarga

Se desea que el sistema de recarga a implementar pueda recargar al dron una vez que el mismo aterrice. La batería a recargar es una LiPo de 5 Ah. Es recomendable que dichas baterías se recarguen a una corriente máxima de 1 C (lo que implica 5 Ah en este caso), con carga balanceada¹ y mediante el método CC/CV². Debido a esto, el tiempo mínimo para recargar la batería a 1 C es una hora. Se desea además que el dron se recargue lo más rápido posible, para así poder realizar varias misiones en un mismo día.

Teniendo en cuenta los requerimientos anteriores, se buscan tecnologías capaces de transferir energía al dron de forma rápida y segura. De esto se distinguen dos tecnologías claramente diferentes: recarga por contacto y recarga inalámbrica.

Recarga por contacto

La recarga por contacto consiste en generar una diferencia de potencial suficiente para poder recargar la batería en pocas horas. De la investigación realizada, se observa que este tipo de recarga es rápida y eficiente ya que permite la transferencia de gran cantidad de energía en un

¹La recarga balanceada monitorea el voltaje de cada celda individual, para que ninguna se cargue más que la otra.

²CC/CV es un modo de recarga de baterías, el cual carga una batería a corriente constante hasta que la misma llega a un voltaje muy cercano a su voltaje máximo. En ese momento se recarga la batería a voltaje constante. Está demostrado que las baterías responden mejor a este tipo de recarga

corto período de tiempo. Sin embargo, este método requiere dos puntos de contacto con el dron a diferente potencial, lo que conlleva una serie de requerimientos a la hora del diseño, como ser:

- Diseño mecánico de la base para establecer puntos de contacto.
- Utilización de materiales conductores inoxidables.
- Aterrizaje con precisión para lograr el contacto.
- Protección contra factores externos durante la transferencia de energía (ej. lluvia).

Ejemplos de la implementación de este tipo de recarga se pueden ver en [6] y en [7].

Recarga inalámbrica

La otra opción considerada para realizar la recarga del dron es la recarga inalámbrica. Este tipo de recarga se está haciendo cada vez más popular en diferentes tecnologías, como ser celulares, autos eléctricos o electrodomésticos. Su popularidad se debe a la gran facilidad que aporta a la hora de recargar baterías, ya que no se necesitan cables y se soportan distancias de recarga de hasta 2 m. Para dispositivos autónomos, esto es una gran ventaja, debido que no se es necesario la intervención del humano para que el aparato cargue, lo que es de especial interés en este caso. Ejemplos de la implementación de este tipo de recarga para drones se pueden ver en [8] o [9].

Sin embargo, éste tipo de recarga conlleva problemas diferentes a los de la recarga por contacto, que deben tenerse en cuenta:

- La recarga inalámbrica utiliza el aire como medio de transporte de energía, por lo que es inevitable la pérdida de energía, siendo generalmente de un 50 %.
- Para lograr la máxima eficiencia, se quiere el máximo acople. Esto implica precisión en el posicionamiento del sistema de recarga.
- Se necesita más energía o más tiempo que el sistema de recarga por contactos para recargar la misma batería.

Por otro lado, este tipo de recarga provee algunas ventajas con respecto a la recarga por contactos. En primer lugar, no se necesitan contactos eléctricos expuestos, los que son susceptibles a factores externos como ser agua. Además, se considera que la complejidad en el diseño mecánico necesario para realizar la recarga por contactos es considerablemente mayor a la recarga inalámbrica. En último lugar, cabe destacar el gran interés del grupo por trabajar con sistemas inalámbricos, e introducirse en el diseño e implementación de los mismos.

Debido a las razones expuestas anteriormente, es que se decide implementar un sistema de recarga inalámbrico para recargar el dron.

5.1.2. Formas de recarga inalámbrica

Dado el creciente mercado por el desarrollo de sistemas de recarga inalámbrico, a lo largo de los últimos años han surgido varias formas de recargas inalámbricas. Sin embargo, dos tecnologías se destacan del resto: recarga inalámbrica por acople inductivo y recarga inalámbrica por acople capacitivo.

Acople capacitivo

Esta tecnología, aún en desarrollo, propone un sistema de recarga utilizando campos eléctricos de alta frecuencia para transferir potencia. En términos generales, el sistema se compone de dos platos conductores, que cuando son energizados, actúan como un condensador, transfiriendo carga de un plato al otro. Debido al tipo de transferencia de energía, este sistema posee varias ventajas:

- Bajo costo y peso
- Excelente eficiencia, incluso sin alineación de los platos.
- Debido a que usa el campo eléctrico, no produce interferencias electromagnéticas.

Sin embargo, el sistema posee varias desventajas como ser:

- Aún en etapas tempranas de desarrollo.
- Sistemas diseñados para bajas potencias y distancias menores a 1 cm.
- Inducción de grandes voltajes en los platos.
- Aún no implementado comercialmente.

Ejemplos de diseños de sistemas de transmisión de energía por acople capacitivo se pueden ver en [10] y en [11].

Este tipo de tecnología es una muy buena opción para el tipo de recarga que se quiere implementar. Sin embargo, aún se encuentra en etapa de desarrollo, debido a que falta todavía mucha investigación. Es por esta razón, que el desarrollo de este tipo de acople se considera más difícil de implementar, por lo que se descarta.

Acople inductivo

A diferencia del caso anterior, la transferencia de energía por acople inductivo es desarrollada y utilizada hace años por diferentes tecnologías. Es, por ejemplo, la tecnología de confianza a la hora de recargar sistemas médicos implantables. En los últimos años, gran interés ha surgido en implementar este tipo de recarga en UVAs y autos eléctricos. Debido a esto, actualmente hay diferentes sistemas para la recarga de drones implementados en el mercado [12] y en desarrollo [13], similares a lo que se desea implementar en este proyecto.

Debido a las razones expuestas anteriormente, se elige este tipo de tecnología para la recarga del dron.

5.1.3. Sistema de recarga a implementar

Debido a la elección del sistema de acople inductivo para implementar la transferencia de energía, se deben tener en cuenta todos los componentes adicionales necesarios para lograr desarrollar un sistema funcional de recarga. Para esto, se considera a este sistema como la conjunción de cajas negras.

En la figura 5.1 se muestra el sistema de recarga en bloques. Los componentes son los siguientes:

- TX/RX: Sistema transmisor y receptor de energía por acople inductivo. Es necesario que el mismo sea capaz de entregar la energía necesaria al cargador para que éste prenda.
- Regulador de voltaje: Se necesita un regulador para adecuar la energía recibida al cargador.
- Cargador: Para controlar la recarga de la batería es necesario un cargador de baterías LiPo automático que implemente el balance y carga CC/CV de la batería.
- Batería: La batería utilizada es una LiPo de 5 Ah, con un voltaje máximo de 12,6 V.

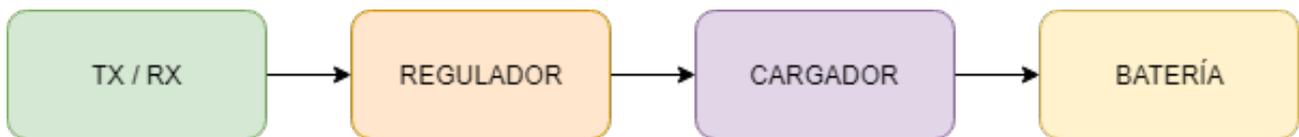


Figura 5.1: Esquema del sistema de recarga en el dron

Cabe mencionar que el control de la recarga (esto es, el inicio y el fin) es regulado por la estación de control, la cual releva el nivel de voltaje de la batería (recibe el dato desde el Pixhawk) y tiempo de carga y decide cortar la transmisión de energía en función de los mismos.

5.2. Elección de componentes

A continuación se especifican los componentes considerados para el diseño del sistema de recarga.

5.2.1. Sistema de transferencia de energía

Como ya se mencionó, se utiliza la transferencia de energía inalámbrica por acople inductivo como método para transferir energía al dron. Teniendo en cuenta que este es un sistema complementario al dron, se decide buscar sistemas ya diseñados y/o implementados que sean adaptables a las necesidades del proyecto. De esta búsqueda surgen varias opciones, que se detallan a continuación.

Módulos comerciales

En un principio, se evalúa la compra de módulos de transferencia inalámbrica por acople inductivo. La clasificación se realiza por potencia transmitida y precio. A continuación se muestran las opciones más viables encontradas:

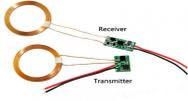
Foto	$V_i(V)$	$I_o(A)$	$V_o(V)$	$P(W)$
	19	2,1	18	35
	12-14	0,6	12	7.2
	9-12	2	5	10

Tabla 5.1: Opciones para la recarga

De lo anterior, sólo los últimos dos módulos están disponibles para su compra. Aunque ambas opciones son viables y pueden servir como plan de respaldo, se encuentra una opción más conveniente que logra una transferencia de energía mayor. La misma se describe a continuación.

Módulos no comerciales

Debido a la escasa oferta en el mercado de módulos de transferencia de energía a la venta, se buscan diseños de sistemas de este tipo que cumplan las necesidades del proyecto. El objetivo es implementar alguno de estos diseños.

De la búsqueda, surge un sistema de transferencia de energía que se adecúa a las necesidades de este proyecto. Este sistema es diseñado e implementado como parte de la tesis de final de carrera de Fida Newaj en Princeton, y es llamado "Wireless Charging System for Autonomous Drones" [3]. El sistema está específicamente diseñado para la recarga de baterías LiPo de 3 celdas ubicadas en drones y es capaz de lograr una potencia a la salida de 24 W, con una eficiencia máxima de 64 %.

Se elije entonces implementar este sistema para poder realizar la recarga sobre el dron. Cabe destacar que el diseño junto con toda la documentación y esquemáticos correspondientes son cedidos por su autor para la realización de este proyecto.

5.2.2. Regulador de voltaje

Tanto los módulos comerciales como el diseño a implementar, consisten en sistemas de transmisión de energía cuyo voltaje de salida es variable, ya que depende de factores como distancia y alineación de las antenas. Debido a que la salida de estos módulos se conecta al cargador de la batería (el cual tiene un rango determinado de voltaje de entrada) es necesario un regulador de voltaje para mantener un voltaje fijo en ese rango.

Debido a esto, se consideran reguladores de voltaje capaces de entregar la potencia requerida a los cargadores. Las opciones más viables disponibles en el mercado se muestran en la Tabla 5.2.

Modelo	V_{in} (V)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	Eficiencia (%)
LM2596	3-40	1,5-40	3	92
XL4015	4-38	1,25-36	5	96

Tabla 5.2: Elección de reguladores DC

A partir de las especificaciones, se decide adquirir ambos para su caracterización y así elegir el más conveniente para el sistema.

5.2.3. Cargador

En el mercado hay una gran cantidad de cargadores de baterías LiPo de 3 celdas. Estos cargadores pueden ser tanto automáticos como programables.

Los cargadores programables no son convenientes en este caso, ya que para que funcionen, se necesita elegir la cantidad de celdas y el tipo de batería a recargar antes de cada carga. Por tanto, se decide buscar cargadores automáticos. Las opciones más viables encontradas se muestran en la Tabla 5.3.

Modelo	V_{in} (V)	P_{in} (W)	I_{out} (A)
Turnigy B4	11-18	No especificado	4
Turnigy 2S/3S	11-14	17	0,8
Tenergy	10-16	24	1

Tabla 5.3: Opciones de cargadores

Aunque la potencia para el cargador Turnigy B4 no se especifica, sí se sabe que la batería es cargada a una potencia de 35 W, por lo que se espera que el consumo del cargador durante la carga sea mayor a este valor.

En principio, se desea utilizar el cargador que consiga cargar la batería más rápido, es decir, el que entregue más potencia. Sin embargo, también se debe tener en cuenta la capacidad del sistema de transmisión para proveer esta potencia. Por tanto, se decide evaluar los tres cargadores, y utilizar el más conveniente según la transferencia de energía que se logre.

5.2.4. Batería

El diseño del sistema completo se basa en lograr recargar la batería del dron. Este sistema utiliza una batería LiPo de 5 Ah de 3 celdas (3,7 V nominales, 4,2 V una celda totalmente cargada). Este tipo de batería almacena una gran cantidad de energía en poco espacio y permite altas corrientes de descarga (hasta 50 C).

5.3. Evaluación e implementación del sistema de transferencia de energía

5.3.1. Conceptos generales

Resonancia

La resonancia en un sistema RLC serie (figura 5.2), ocurre cuando el valor de los componentes es tal que, a cierta frecuencia, el efecto capacitivo y el inductivo se anulan entre sí, quedando un sistema prácticamente resistivo y con baja impedancia³. El modelo matemático del sistema y su análisis se puede ver en [12]. A partir de este análisis, se obtiene que si se cumple la ecuación 5.1, el sistema es (idealmente) resistivo puro.

$$C = \frac{1}{\omega_o^2 L} \tag{5.1}$$

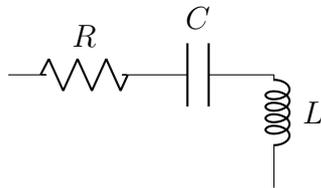


Figura 5.2: Circuito LCR en serie

En este caso, al tener dos bobinas (una transmisora y otra receptora) este tipo de acople permite una transferencia máxima de potencia entre ambas bobinas.

En particular, se distinguen dos tipos de sistemas resonantes. La clasificación depende de cómo se ubiquen los componentes, si en serie o en paralelo. En este caso, se encuentra que el modelo en serie es mejor para sistemas de carga inalámbrica [14], por lo que el diseño utiliza este modelo.

Modelo del transformador

Para poder entender el sistema diseñado, es necesario comprender los conceptos básicos de la transformación de energía que ocurren. En este caso, para entender los conceptos más importantes, el acople de las bobinas se modela como un transformador ideal con inductancias de fuga (L_1 y L_2) y magnetizante (L_m), como se observa en la figura 5.3.

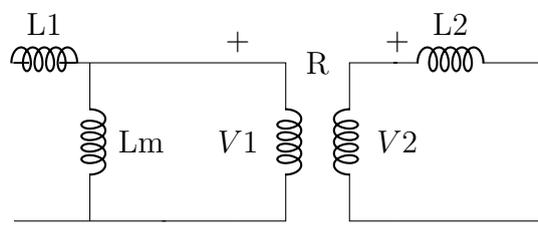


Figura 5.3: Modelo del transformador

³En estos casos, la resistencia es baja, y esta formada por la resistencia de los cables y de la bobina.

La relación del número de vueltas de la bobina primaria con la secundaria está representado por R . Para un transformador ideal, con número de vueltas de la bobina primaria N_1 y la secundaria N_2 , se cumplen la siguiente ecuación:

$$R = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1} \quad (5.2)$$

De esta forma, se tiene una relación entre el número de vueltas de las bobinas y el voltaje en las mismas.

La resonancia del sistema estará dada por L_1 y L_2 y los condensadores en serie a colocar. Por tanto, en el diseño del sistema se deben encontrar L_1 y L_2 , para luego poder elegir los condensadores apropiados y así lograr la resonancia. Para encontrar los valores de inductancia, es necesario realizar las siguientes medidas:

En primer lugar, se mide la inductancia α de la bobina primaria, dejando la secundaria abierta, dando como resultado:

$$L_1 + L_m = \alpha \quad (5.3)$$

En segundo lugar, se mide la inductancia β de la bobina secundaria, dejando la primaria abierta, esto da como resultado:

$$L_2 + L_m \cdot R^2 = \beta \quad (5.4)$$

Finalmente, L_1 , L_2 y L_m se relacionan a través de la inductancia γ , medida desde la bobina primaria con la secundaria cortocircuitada, lo que da la siguiente expresión:

$$L_1 + L_m \parallel \left(\frac{L_2}{R^2} \right) = \gamma \quad (5.5)$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores, se obtienen valores para L_1 , L_2 y L_m . Este procedimiento debe tenerse en cuenta al momento de diseñar el circuito tanque.

5.3.2. Evaluación del diseño

El sistema de transmisión de energía implementado en [2] consta de un módulo de transmisión y uno de recepción de energía y utiliza el sistema de acople inductivo con resonancia para transferir la energía. A su vez, a la salida del módulo de recepción se le incluye un cargador de baterías LiPo de 3 celdas.

El sistema funciona a una frecuencia de resonancia de 100 kHz, siendo diseñado para un voltaje de entrada y salida de 12 V.

El módulo de transmisión de energía está conformado por un chip de potencia (que funciona como medio puente H), capaz de transformar voltaje DC en AC. Luego, las bobinas en serie con los condensadores producen la resonancia.

En el módulo receptor, se rectifica y filtra la señal, para obtener voltaje DC. Un esquema del sistema puede verse en la figura 5.4.

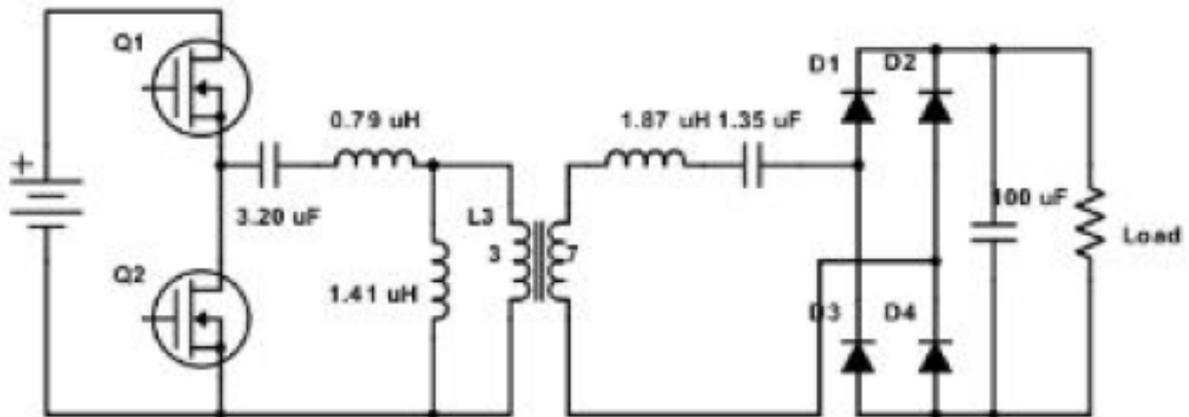


Figura 5.4: Esquema del diseño del sistema de transmisión. Imagen obtenida de [3].

Adicionalmente, a la salida del receptor, el sistema incorpora un cargador de batería. Sin embargo, el cargador no logró hacerse funcional en el diseño original, por lo que en este caso no se incluye en la implementación, y se reemplaza por un cargador de baterías comercial. El detalle del diseño del sistema y los resultados obtenidos originalmente se pueden ver en [3].

Este proyecto, sin embargo, presenta otros requisitos que los obtenidos en el diseño original. En primer lugar, no se tiene limitación para el voltaje de entrada del sistema, y en segundo, se prevé una distancia de carga máxima de 0,5 cm debida al propio diseño de la base de recarga. Esto presupone algunos cambios en el sistema de recarga a implementar.

Simulaciones

La simulación del sistema permite cierta seguridad a la hora de la implementación, y actúa como herramienta de testeo y verificación de señales en diferentes puntos del circuito. Debido a esto, se implementa la simulación del sistema de transferencia de energía incluyendo los componentes básicos utilizados en el diseño.

Para la simulación se utiliza el software TINA-TI⁴, propiedad de Texas Instruments. Este software utiliza como base de simulación SPICE y está especialmente diseñado para simular componentes fabricados por Texas Instruments. Se elige ya que en este caso el puente H utilizado por el diseñador es de TI. El esquema del circuito simulado se muestra en la figura 5.5.

⁴<http://www.ti.com/tool/TINA-TI>

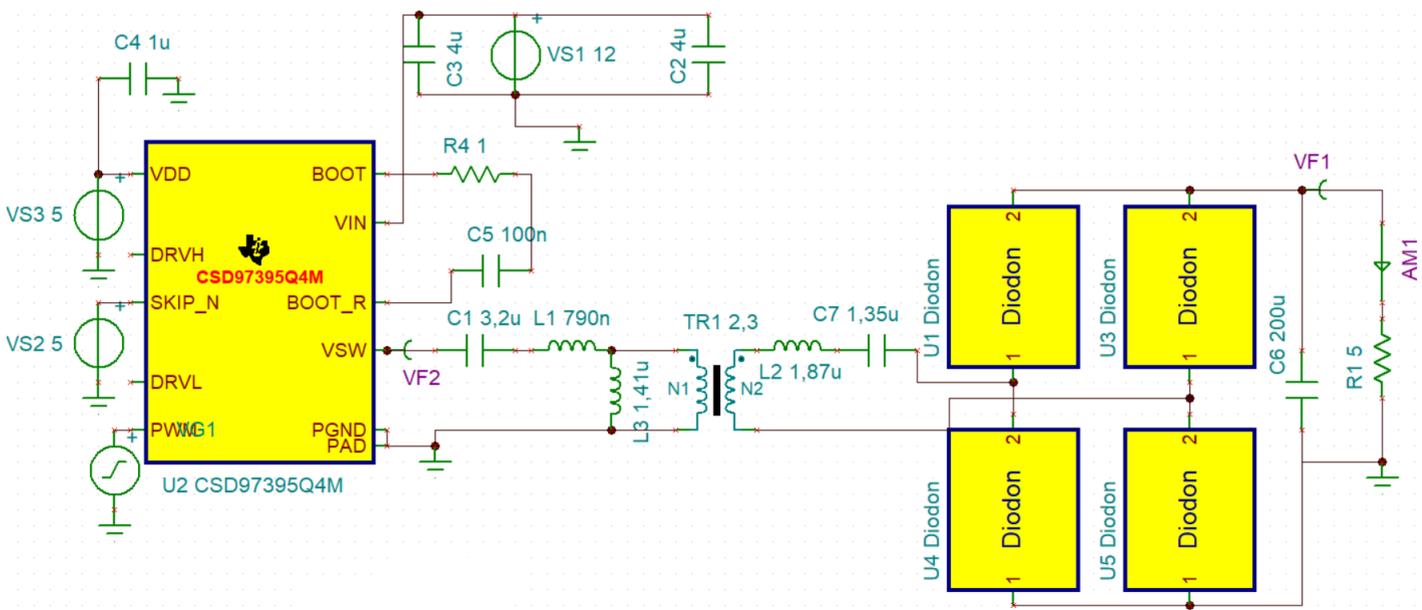


Figura 5.5: Simulación del diseño del sistema de transmisión de energía

El resultado de la simulación del circuito de la figura 5.5 se muestra en la figura 5.6. A partir de las simulaciones, se verifica que el sistema es capaz de entregar la potencia para la que fue diseñado (30 W).

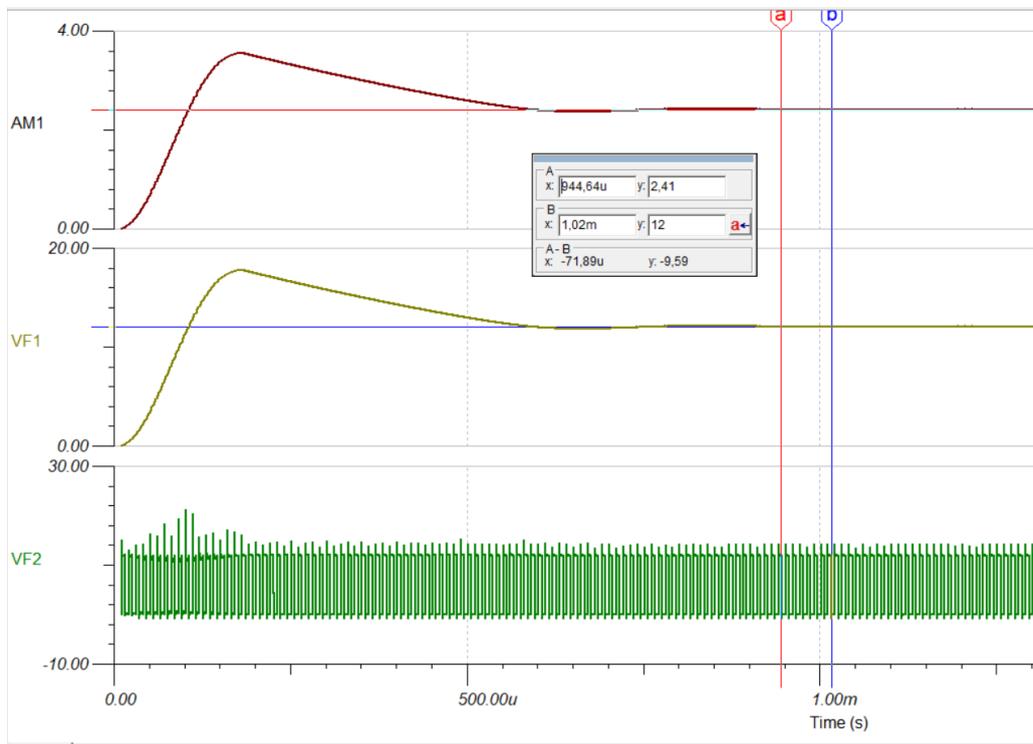


Figura 5.6: Resultado de la simulación del sistema de transmisión de energía.

5.3.3. Implementación de los módulos TX/RX

Para implementar el sistema de transmisión de energía, se deben tener en cuenta los requerimientos de recarga para este proyecto, los cuales son diferentes a lo especificado por el diseño original. El sistema de recarga diseñado en [3] cumple con las siguientes especificaciones:

- Voltaje de entrada: 12 V
- Potencia de salida máxima: 28 W
- Voltaje de salida @28 W : 10,8 V
- Distancia óptima de acople: 0 cm

Sin embargo, en este proyecto se tienen requerimientos diferentes. Estos requerimientos son realizados tomando en cuenta el sistema conformado por los módulos de transferencia de energía y el regulador de voltaje, así como la posición del dron al aterrizar sobre la base.

- Voltaje de entrada⁵: 12 V - 20 V
- Potencia de salida⁶: La máxima posible
- Voltaje de salida⁷: 11 - 18 V
- Distancia óptima de acople: 0,5 cm

Estos requerimientos hacen que el sistema original de recarga necesite de modificaciones para lograr una recarga exitosa.

Para poder implementar estas modificaciones, se debe tener en cuenta que el sistema posee un factor variable, que es el diseño de las antenas. La implementación del sistema se enfoca entonces en lograr la mejor configuración de antenas que logre la mayor transmisión de energía posible.

Módulo transmisor

El módulo de transmisión de energía utilizado es el diseñado en [3]. Este módulo es el encargado de convertir el voltaje DC a AC para lograr un sistema de acople inductivo con la placa receptora. En la figura 5.7 se muestra el esquemático del módulo de transmisión.

⁵Voltaje de funcionamiento (limitado por el regulador de voltaje del módulo de transmisión de energía).

⁶Diseñar un sistema con la potencia máxima de salida posible permite implementar una recarga más rápida.

⁷Voltaje de funcionamiento de los cargadores

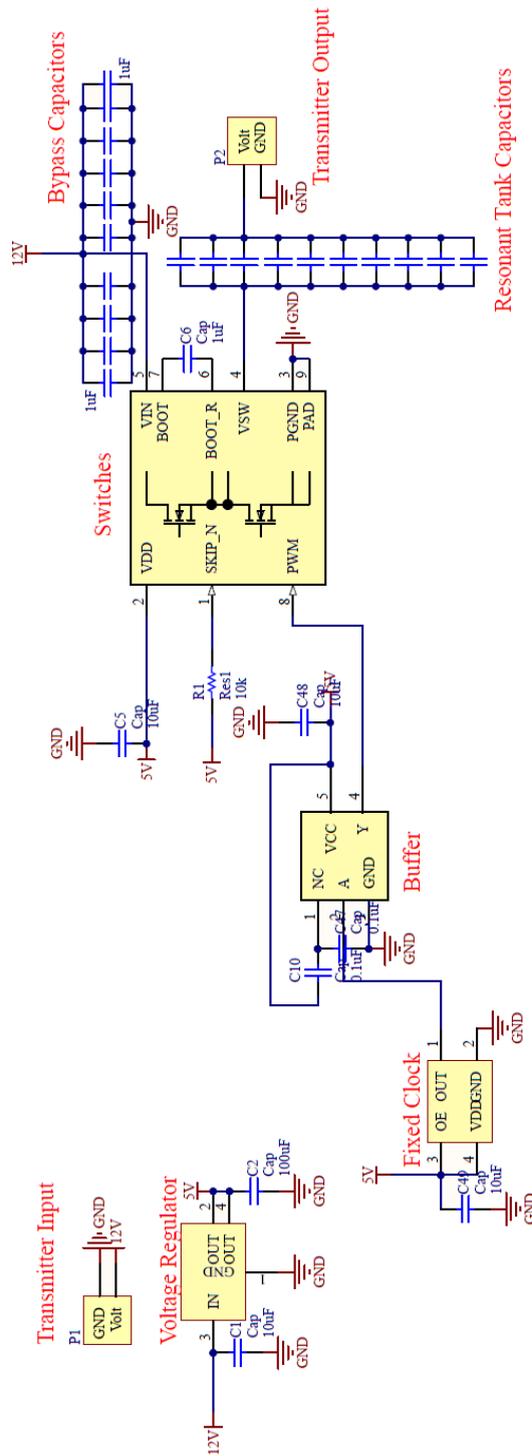


Figura 5.7: Esquemático del módulo de transmisión de energía.

De las simulaciones del sistema realizadas y del estudio de la hoja de datos del puente H, se verifica que al aumentar el voltaje de entrada del puente, el sistema se vuelve más eficiente y se logra un voltaje mayor a la salida, incluso con peor acople. Esto permite, entre otras cosas, definir un rango de voltaje de funcionamiento del sistema mayor a 12 V, lo que a su vez, conlleva

a la elección de componentes que soporten este rango de funcionamiento.

A partir de esto es que se eligen los siguientes componentes para el sistema de transmisión (ver Tabla 5.4).

Componente	Modelo/Tipo	Valor
Voltage regulator	LM1117MP-5.0/NOPB - TI	-
Switches	CSD97395Q4MT - TI	-
Fixed Clock	OM-0100-C8-100.00kHz - MC	-
Buffer	SN74LVC1G17DBVR - TI	-
Bypass Capacitors, C6	08055C105MAT2A - AVX	$1\mu F$, 50V
C48, C49, C5	MURATA	$10\mu F$, 20V
C2	MURATA	$47\mu F$, 10V
C1	Mundo electronico - Cerámico	$10\mu F$, 50V
C10, C47	Eneka - Cerámico - 0805	$0.1\mu F$, 50V
R1	Eneka - Cerámico - 0805	$10 k\Omega$
Resonant Tank Capacitors	Eneka - Cerámico - 0805	$22nF$, $47nF$ $10nF$ - 100V

Tabla 5.4: Componentes utilizados en el armado de la placa transmisora

La elección de los valores de los condensadores para el circuito tanque se realizan al final del diseño una vez diseñadas y caracterizadas las bobinas. Para las conexiones de alimentación y de las bobinas se eligen conectores XT60. Por último, y por recomendación de la hoja de datos del puente H^8 y de lo visto en el análisis térmico realizado en [3], se decide colocar un disipador sobre el chip.

Para la construcción de la placa, se utilizan los planos proporcionados por el diseño original, y la PCB se manda a imprimir. Los componentes se sueldan a mano con soldador y utilizando pistola de calor. El layout utilizado es el mostrado en la figura 5.8 y la placa terminada se muestra en la figura 5.9.

⁸Hoja de datos del Switch: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/csd97395q4m.pdf>

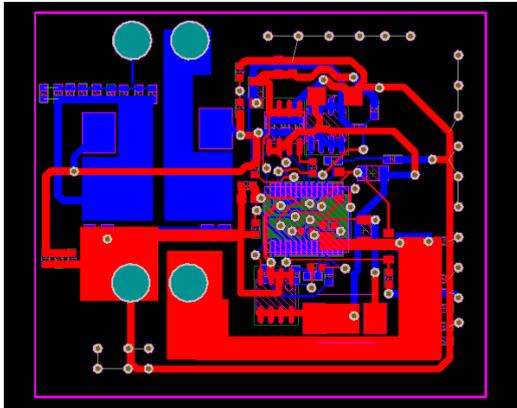


Figura 5.8: Layout del módulo de transmisión de energía

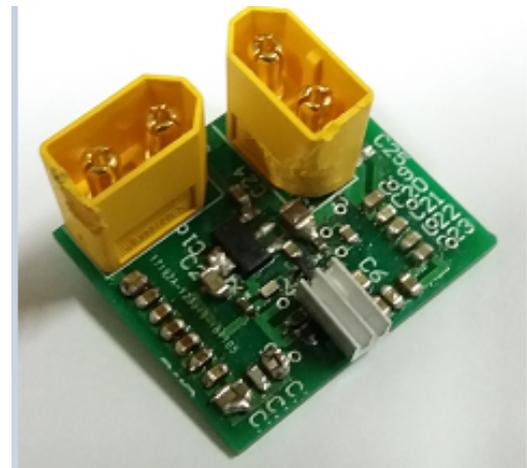


Figura 5.9: Placa terminada del módulo de transmisión de energía

Módulo receptor

En el caso de la placa de recepción de energía, la misma se diseñó desde cero debido a la remoción del cargador implementado en el diseño original. Tanto para el diseño del esquemático como para el del layout se utilizó el programa Altium Designer⁹.

El esquemático de la placa se muestra en la figura 5.10. El módulo cuenta con un circuito tanque para el acople inductivo y se utiliza un puente rectificador de onda completa con un condensador de filtrado para obtener el voltaje DC.

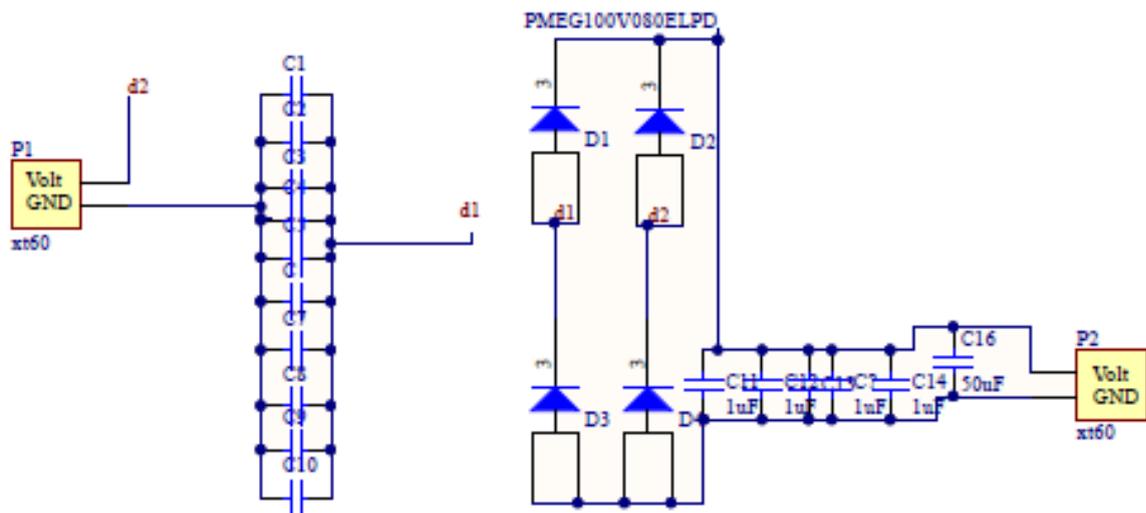


Figura 5.10: Esquemático del módulo de transmisión de energía

Los diodos elegidos son tales que tienen la menor caída de voltaje en directa posible, y soportan

⁹<https://www.altium.com/>

una corriente directa de 8 A.

En tanto, el condensador de filtrado se elige para obtener un voltaje de ripple¹⁰ lo menor posible. Este condensador es electrolítico y el valor se elige teniendo en cuenta la ecuación para el ripple del sistema:

$$V_{ripp} = \frac{I_L}{2 \cdot f_{in} \cdot C} \quad (5.6)$$

De esta ecuación, se obtiene que para un condensador electrolítico de 50 μF y una corriente máxima de carga de 2 A (lo que pide el regulador de voltaje) el ripple del sistema es de 0,2 V. Aunque un condensador más grande mejoraría el ripple, también haría más lenta la estabilización del sistema. Dado esto, y a que su tamaño se ajusta al de la placa, se decide utilizar un condensador electrolítico de 50 μF .

Además del condensador electrolítico colocado a la salida del circuito, se utilizan condensadores cerámicos en paralelo. Esto se debe a que estos condensadores poseen, a diferencia de los electrolíticos, baja impedancia a altas frecuencias (ESR) y según [15], la colocación de estos condensadores mejoran la respuesta del sistema.

Finalmente, los componentes utilizados para la implementación de la placa receptora son los siguientes:

Componente	Modelo/Tipo	Valor
D1, D2, D3, D4	PMEG100V080ELPD - Nexperia	-
Resonant Tank Capacitors	Eneka - Cerámicos - 0805	22nF, 47nF 10nF - 100V
C11-C15	Eneka - Cerámicos - 0805	1uF
C16	Eneka - Electrolítico	50 μF - 50 V

Tabla 5.5: Componentes utilizados en el armado de la placa receptora

El layout de la placa se diseñó desde cero y se mandó imprimir. Al igual que con la placa transmisora, los componentes se soldaron a mano. El layout diseñado y la placa finalizada se pueden ver en las figuras 5.11 y 5.12 respectivamente.

¹⁰Pequeño componente de alterna que queda al rectificar una señal, y se reduce mediante el filtrado utilizando un condensador.

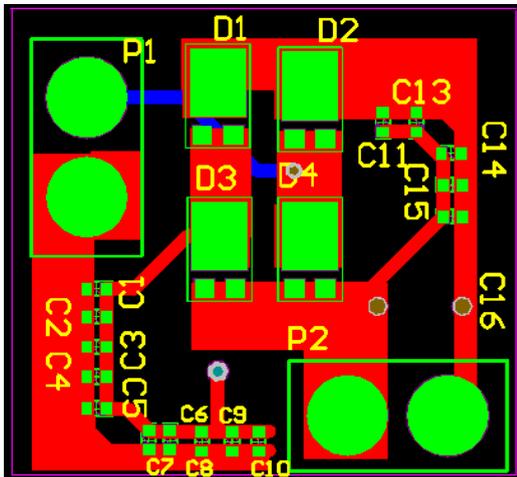


Figura 5.11: Layout del módulo de recepción de energía



Figura 5.12: Placa terminada del módulo de recepción de energía

Bobinas

Las bobinas a utilizar en los chips de recarga son una parte importante del sistema, y bien diseñadas, pueden ser el elemento crucial para lograr un buen rendimiento. Esto se debe a que las bobinas son las encargadas de realizar el acople entre el módulo de transmisión y el de recepción de energía. La elección de su forma y material es crucial a la hora de diseñar un sistema de acople inductivo.

En particular, se trata de diseñar las bobinas de forma de tener las menores pérdidas de energía posibles. De acuerdo a [16], las condiciones de las bobinas que afectan a la transferencia de energía son las siguientes:

- Acople y alineación
- Efecto skin y de proximidad
- Patrón del campo magnético

De esta forma, mediante el diseño de las bobinas, se intenta minimizar el efecto sobre el sistema de cada uno de los puntos mencionados anteriormente.

Acople y alineación

Respecto a los efectos de acople y alineación, para minimizar pérdidas por estas razones es que se implementa un sistema de acople especial para la base, de forma de obtener las menores pérdidas posibles.

Además de lo anterior, se tiene que mejorando algunas cualidades en la construcción de las antenas, el sistema logra ser más eficiente.

En particular, para caracterizar qué tan bueno es el acople, se utilizan dos parámetros, el factor de acople (k) y el factor de calidad (Q).

El factor de acople k , es una medida del efecto de los campos magnéticos pasando a través de las bobinas. Este factor va de 0 a 1, y cuanto más cercano a 1, se entiende que hay un mejor acople.

El factor de calidad Q , es un parámetro que indica la relación entre la energía almacenada (utilizada) y la energía que disipa un componente, en un ciclo. Un alto Q es preferido, ya que indica una baja tasa de pérdida de energía en relación a la energía almacenada. En particular, para una bobina, un factor alto de Q significa una resistencia pequeña y por tanto, un comportamiento similar al de una bobina ideal.

Para lograr factores k y Q altos, se realizan las siguientes recomendaciones a la hora de diseñar las bobinas [12]:

1. El radio externo de la bobina receptora tiene que ser maximizada.
2. El radio interno de la bobina transmisora tiene que ser minimizada.
3. El radio de la antena transmisora debe ser mayor que el de la receptora.
4. Minimizando el diámetro del cable mejora el Q de la bobina.

Los puntos anteriores, junto a los siguientes, son claves para construir las bobinas.

Efecto skin y de proximidad

El efecto skin (o efecto pelicular) ocurre debido a que la corriente AC en un cable, tiende a circular sólo por las paredes del mismo, lo que lleva a menos área conductora, y por tanto mayor resistencia a la circulación de corriente.

Por otro lado, el efecto de proximidad se da al tener dos o más cables cercanos, conduciendo corriente AC. Estas corrientes producen efectos mutuos indeseados en los cables cercanos, lo que afecta la distribución de corriente en ellos, aumentando también la resistencia. En este caso, cuanto más alta la frecuencia de la señal, mayor es el efecto producido.

El efecto skin y de proximidad se pueden atenuar a la vez, y simplemente alcanza con elegir el material adecuado para las bobinas. Al elegir un material con más área conductora (sin aumentar el área del cable), ambos efectos se reducen. En particular, existe un tipo de cable diseñado para esto, el cable de Litz. Este cable es diseñado de una forma especial, donde, dependiendo de la frecuencia de la señal, se minimizan los efectos no deseados.

En este caso, se obtiene que el cable de Litz a elegir para una frecuencia de trabajo de 100 kHz, debe tener un AWG¹¹ entre 38 y 40 [17].

Patrón de campo magnético

Para controlar el patrón de campo magnético, se implementa el uso de materiales magnéticos llamados magnetic shields. Los materiales magnéticos tienen la propiedad de influir en la dirección del campo magnético cercano. Materiales como la ferrita, tienen alta permeabilidad

¹¹AWG es un calibre para el diámetro de cable. Cuanto más alto el número, más delgado el cable.

magnética, lo que los hacen ideales para concentrar el campo magnético.

Estos materiales, correctamente ubicados como se muestra en la figura 5.13, ayudan a concentrar casi el 90% del flujo magnético entre la bobina transmisora y la receptora. Esto es beneficioso también en el sentido que el campo magnético de la transmisión de energía no interfiera con componentes externos, como ser circuitos integrados o materiales conductores.

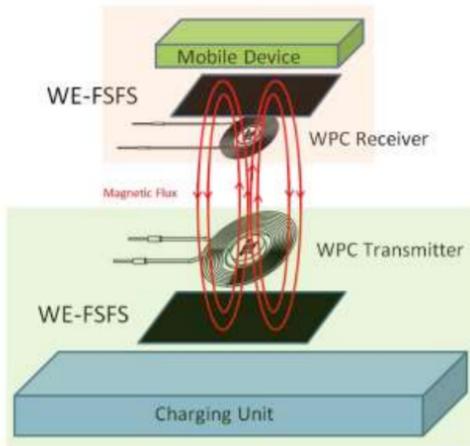


Figura 5.13: Flujo de campo magnético.



Figura 5.14: Lámina de ferrita WE-FSFS 354.

La elección de qué tipo de ferrita utilizar, y sobre todo el grosor, depende mayormente de la frecuencia de funcionamiento del sistema. En este caso, y a partir de la información proporcionada en [18] se obtiene que el mejor material magnético a utilizar para esta aplicación son las láminas de ferrita WE-FSFS 354 (figura 5.14).

Finalmente, a partir de los efectos vistos anteriormente, se procede a construir las bobinas. Las mismas se realizan utilizando cable de Litz 38 AWG y siguiendo las recomendaciones vistas anteriormente para su construcción. Por último, se les coloca las láminas de ferrita¹². El resultado final se puede ver en la figura 5.15.

¹²Tanto las láminas como las vueltas del cable de Litz son pegadas entre sí utilizando cinta kapton. Esta cinta es no conductora, no afecta al campo magnético generado y es capaz de soportar altas temperaturas.

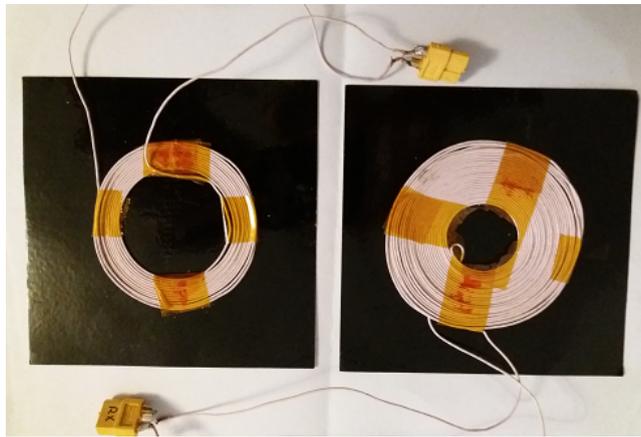


Figura 5.15: Implementación final de las antenas de recarga

Circuito tanque

El circuito tanque es la parte del circuito de transmisión de energía que realiza el acople entre el transmisor y el receptor. Está conformado por los condensadores de resonancia en serie con las bobinas, ubicados tanto en la placa transmisora como en la receptora.

Lo ideal es que el circuito resuene a la frecuencia de funcionamiento del switch, en este caso 100 kHz. Dado que las bobinas se diseñan de antemano para lograr una buena eficiencia, los condensadores se eligen últimos para lograr el acople.

En primer lugar, se deben caracterizar las bobinas. Para esto, utilizando un LCR¹³ y el setup para las bobinas que se muestra en las figuras 5.16 y 5.17 respectivamente, se miden las inductancias α , β y γ como se muestra en las figuras 5.18, 5.19, y 5.20.¹⁴



Figura 5.16: LCR utilizado para realizar las medidas¹⁵.



Figura 5.17: Setup para la medición de las bobinas

Para realizar las medidas, se colocan las bobinas enfrentadas y separadas en 5 mm. Utilizando el LCR, se mide la inductancia de la bobina primaria con la secundaria abierta (inductancia α). Luego, se mide la inductancia de la secundaria, con la primaria abierta (inductancia β). Por

¹³Agilent 43263B. Instrumento capaz de medir impedancias, inductancias y condensadores a varias frecuencias.

¹⁴Estos ensayos deben hacerse simulando una situación real de acople, es decir, utilizando las ferritas, a una distancia de 5 mm entre las bobinas.

último se mide la inductancia del primario con el secundario en corto (inductancia γ).

Luego, a partir de las ecuaciones 5.3, 5.4 y 5.5 y utilizando Matlab, se hallan los valores de inductancia de las bobinas, valores que sirven para calcular los condensadores necesarios para producir la resonancia.

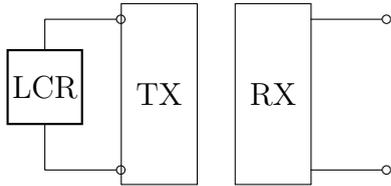


Figura 5.18: Setup para la medida de la inductancia α .

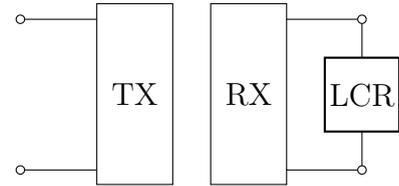


Figura 5.19: Setup para la medida de la inductancia β

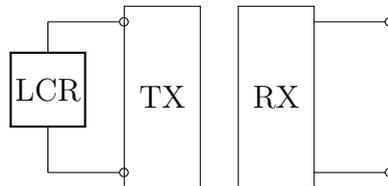


Figura 5.20: Setup para la medida de la inductancia γ

Los valores encontrados para las bobinas y los calculados para los condensadores del módulo de recarga se muestran en la Tabla 5.6.

	L_1 (μH)	L_2 (μH)	L_m (μH)	C_{Tx} (nF)	C_{Rx} (nF)
Valor	8,17	13,6	10,8	285	209

Tabla 5.6: Valores de componentes del circuito tanque para el módulo de recarga.

Para lograr un mejor ajuste de frecuencias de resonancia, una vez soldados, los condensadores son medidos nuevamente, y si es necesario, se remueve o agrega alguno.

5.4. Armado del sistema de recarga

Un esquema del sistema de recarga se muestra en la figura 5.21

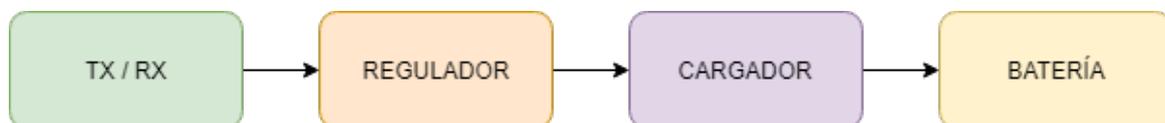


Figura 5.21: Esquema del sistema de recarga en el dron.

Con los módulos de transmisión y recepción de energía ya implementados, se procede a la evaluación y elección de los demás componentes del sistema.

¹⁵Configurado a 100 kHz y 1000 mV, para medir L_s y R_s .

5.4.1. Reguladores de voltaje

El regulador de voltaje a la salida de los módulos de transmisión de energía es necesario debido a que cumple varias funciones en el sistema.

En primer lugar, y como se analiza en [3], el voltaje de salida del sistema de recarga implementado es dependiente de la carga/corriente que circule por el mismo. Debido a que el cargador tiene un rango de voltaje de entrada de funcionamiento acotado y que la carga que impone en la entrada es variable, es necesario regular la salida de los módulos para entregar el mismo voltaje en toda situación.

En segundo lugar, si se desea colocar dos o más módulos de recarga en serie, es necesario colocar un sistema que los independice uno del otro, sino los efectos de las impedancias vistas podrían afectar a los módulos, y producir salidas no deseadas.

Para este proyecto, se buscan reguladores con la mayor eficiencia posible, en un rango de funcionamiento que permita alimentarlos con los módulos de recarga y utilizarlos para alimentar a los cargadores. Por tanto, se buscan las siguientes características para los reguladores:

- V_{in} (V): 0-30
- V_{out} (V): 12-18
- I_{in} (A): 0-1,5
- I_{out} (A): 0-1,2

Los reguladores encontrados en el mercado que cumplen con estas características se muestran en la tabla 5.2. Los mismos son adquiridos y testeados en las condiciones más exigentes de uso posibles para este sistema¹⁶. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.7.

	V_{in} (V)	P_{in} (W)	V_{out} (V)	P_{out} (W)	Eficiencia (%)
LM2596	[18-23]	30,5	13,5	19,65	65
XL4015	[16-23]	20	13,5	18,05	90

Tabla 5.7: Resultados del testeo de los reguladores ¹⁷.

A partir de los resultados obtenidos, se decide utilizar el regulador XL4015, pues para los rangos de uso necesarios, es el que posee mayor eficiencia. Los resultados imponen además una condición para los módulos de transmisión de energía, y es que estos deben entregar una potencia mínima de 20 W @16V para lograr un sistema funcional.

¹⁶Para las pruebas se setea un voltaje de salida del regulador de 13.5 V y una carga de 9 Ω realizada con 8 resistencias cerámicas de 68 Ω . Para energizarlos se utiliza una fuente SIGLENT SPD3303C.

¹⁷Los resultados mostrados son los que proveen la potencia mínima necesaria para lograr el funcionamiento de los cargadores.

5.4.2. Cargadores

Para poder recargar la batería LiPo utilizada por el dron, es necesario utilizar cargadores que implementen el algoritmo de carga CC/CV junto a una recarga balanceada. Así mismo, se necesita cargadores automáticos, que comiencen a cargar cuando se les entrega energía.

Se encuentran tres modelos diferentes de cargadores en el mercado que cumplen con esto (Tabla 5.3). Luego de su adquisición, se procede a caracterizarlos. Los tres se testean utilizando la misma batería y la fuente de alimentación¹⁸. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.8¹⁹.

	Turnigy B4	Turnigy	Tenergy
Pin max. (W)	42,8	16,8	13,9
Tiempo carga (min)	51	180	280

Tabla 5.8: Resultados de la caracterización de los cargadores.

A partir de los resultados anteriores, y teniendo en cuenta que los módulos a implementar son capaces de entregar un máximo teórico de 24 W, se decide utilizar el cargador Tenergy, pues es el que carga más rápido consumiendo aproximadamente 14 W.

Otra opción a considerar, es la utilización de dos módulos, donde, colocando en serie al circuito receptor (incluyendo los reguladores), se podría lograr la suma de potencias, y luego, con un tercer regulador, alcanzar la potencia necesaria para colocar el cargador Turnigy B4. Sin embargo, esto conllevaría agregar más peso y pérdidas de eficiencia en la transmisión, solo para cargar la batería en la mitad de tiempo. Aunque esto sería beneficioso, se cree que esta forma no es la más eficiente ya que la pérdida de energía sería demasiada.

5.5. Testeo y análisis de resultados

Una vez implementado, el sistema de recarga es testado para su caracterización. Se distinguen 3 etapas diferentes de testeo:

1. Testeo del sistema de transmisión de energía.
2. Testeo del sistema con regulador.
3. Testeo del sistema con regulador, cargador y batería.

Para las pruebas se utiliza un multímetro EXTECH MN35 y un osciloscopio Tektronix TBS 1062. La fuente de alimentación es una SIGLENT SPD3303C y las resistencias utilizadas como carga son cerámicas de 68 Ω y 10 W.

¹⁸Batería LiPo de 5Ah y 50C. Fuente de alimentación SIGLENT SPD3303C.

¹⁹El tiempo de carga se compara entre los mismos voltajes de batería inicial y final para los tres casos (11,8 V), y con la misma alimentación para los cargadores (13,5 V).

5.5.1. Testeo del sistema de transferencia de energía (TX/RX)

En primer lugar, se testea el sistema de transferencia de energía implementado. Para ello, se lo conecta a una fuente y a una carga resistiva de $9\ \Omega$ y $80\ \text{W}$ y se varía el voltaje de alimentación. La ubicación de las bobinas se realiza tratando de representar condiciones realistas de uso (con una separación de $5\ \text{mm}$ entre ellas). El setup para la prueba se puede ver en la figura 5.22.

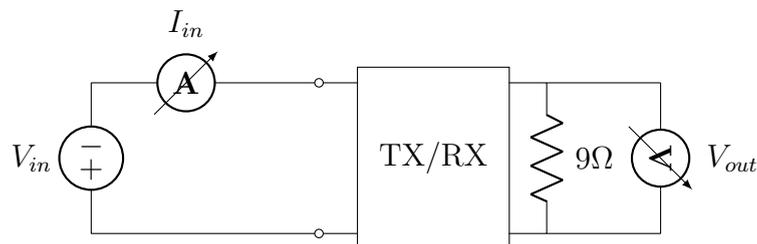


Figura 5.22: Diagrama del setup de medida para el test.

Las medidas son realizadas con un multímetro y un osciloscopio²⁰. La fuente muestra el voltaje entregado y tiene la capacidad de medir la corriente de salida (I_{in}). Los resultados de la prueba se pueden ver en la Tabla 5.9.

V_{in} (V)	P_{in} (W)	V_{out} (V)	P_{out} (W)
16	19,1	8,7	10,4
17	20,2	9,8	10,7
18	23,0	10,6	12,4
19	26,6	11,5	14,5
20	31,6	12,6	17,5
21	37,6	14,0	21,5
22	45,5	15,4	26,1
23	49,2	16,0	28,1
24	56,9	17,2	32,5

Tabla 5.9: Resultados del testeo del sistema de transferencia de energía.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que para una alineación ideal, y con $0,5\ \text{cm}$ de separación entre las bobinas, la máxima potencia a la salida es de $32,5\ \text{W}$ @ $17\ \text{V}$.

Eficiencia

En la figura 5.23 se muestra la eficiencia del sistema según la potencia de salida. A partir de esto, se observa que se logra una eficiencia máxima de $57,36\ \%$ a $26,1\ \text{W}$. Se considera que la eficiencia alcanzada es buena, sobre todo si se tiene en cuenta que la transmisión se implementa a una distancia de $0,5\ \text{cm}$ entre las bobinas.

²⁰El osciloscopio se utiliza para ver el ripple y el voltaje en VSW.

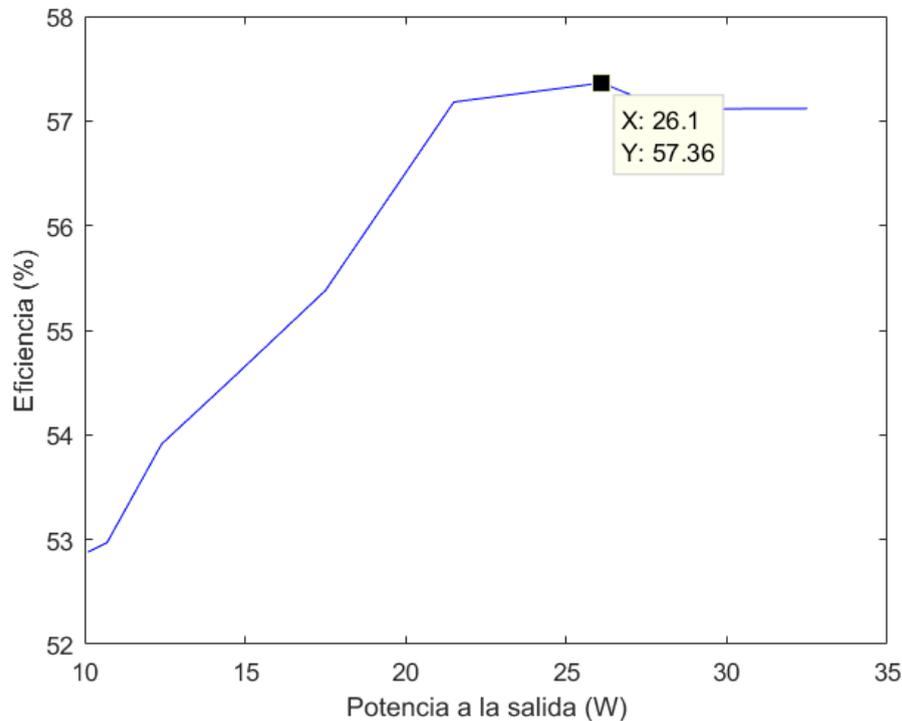


Figura 5.23: Eficiencia del sistema de recarga.

Se cree que la utilización de los Magnetic Shieldings así como la implementación de técnicas para reducir caídas de voltaje en pistas y componentes (realizados en el diseño) son los factores que más contribuyen a lograr un sistema eficiente.

Comportamiento y limitaciones del sistema implementado

Durante las pruebas, se observa que al disminuir la carga resistiva impuesta al sistema, el voltaje de salida disminuye. Este efecto ocurre debido a que al disminuir la carga, fluye más corriente por el sistema, lo que produce caídas de voltaje mayores en componentes y vías. Esto genera que el voltaje de salida con una entrada de 12 V y una carga de 9Ω sea de apenas 6,26 V. A partir de esto, surge la idea de aumentar el voltaje de entrada del sistema, para así lograr un voltaje de salida mayor.

Según la hoja de datos del puente H, el voltaje de entrada máximo permitido del mismo es de 30 V y su pico de rendimiento máximo es a 24 V. Sin embargo, durante las pruebas se observa que alimentando el sistema con 26 V, el puente H deja de funcionar. Al investigar la causa, se verifica que la razón de corte es debido a que el voltaje a la salida del chip (línea VSW, ver la figura 5.24) presenta picos que superan los 30 V cuando es alimentado con 26 V, lo que causa un corte en el funcionamiento del chip. Se verifica además que al disminuir el voltaje, el sistema comienza a funcionar normalmente, confirmando lo anteriormente establecido. Los picos de voltaje en la línea VSW son causados por la impedancia magnetizante vista desde esta línea.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el voltaje de entrada máximo del regulador de

voltaje (según la hoja de datos) del módulo de transferencia de energía es de 20 V. Aunque se demuestra que el sistema es funcional a un voltaje mayor, no se recomienda forzar el componente, por lo que se recomienda el uso del módulo a un voltaje no mayor a 20 V. Aún así, las pruebas se realizan exigiendo el sistema para comprobar los mecanismos de seguridad y limitaciones de los componentes.

En la figura 5.24 se puede ver la ubicación de la línea VSW en el circuito, y en la figura 5.25 se observa el resultado de la medida realizada en esta línea, junto al voltaje de salida del sistema, para una entrada de 24 V.

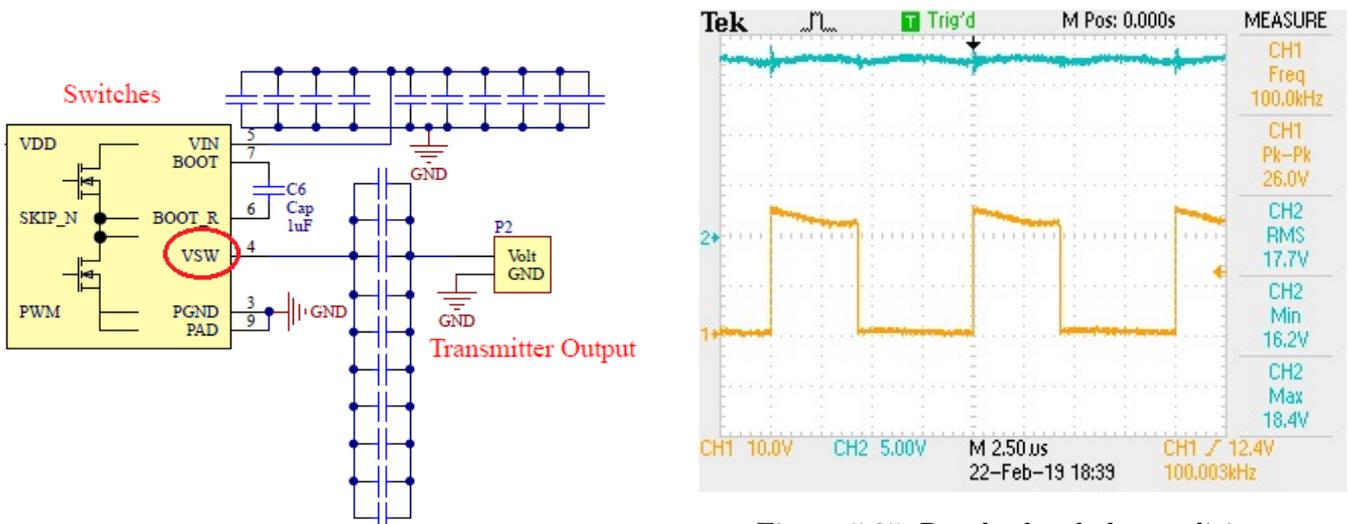


Figura 5.24: Ubicación de línea VSW en el circuito.

Figura 5.25: Resultados de las mediciones realizadas sobre el módulo (voltaje a la salida (azul) y línea VSW (amarillo)).

5.5.2. Testeo del sistema TX/RX con el regulador

Para el segundo caso de prueba, se conecta al sistema de transmisión de energía el regulador de voltaje XL4015 y a éste una carga de 9 Ω, como se muestra en la figura 5.26.

Se alimenta al sistema con una fuente, y variando el voltaje de entrada, se mide el voltaje de salida con un multímetro²¹.

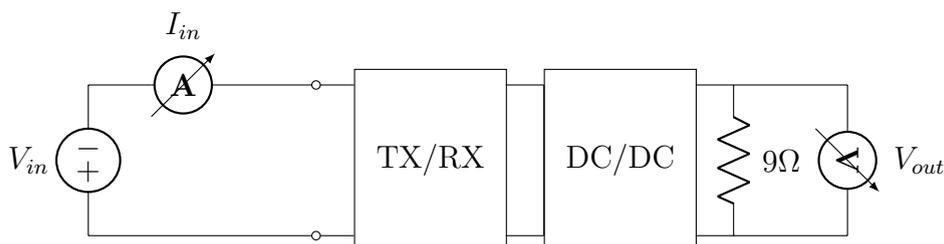


Figura 5.26: Diagrama del setup de medida para el test.

²¹El regulador se regula cada vez que se varía el voltaje de alimentación para entregar la máxima potencia disponible.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.10.

Vin (V)	Pin (W)	Vout (V)	Pout (W)
17	16,6	8,9	8,0
18	20,7	9,4	9,6
19	23,5	10,4	11,8
20	33,0	12,6	17,2
21	39,2	13,7	20,5
22	44,0	14,5	22,9
23	46,2	15,2	25,1
24	48,5	15,5	26,1

Tabla 5.10: Resultados de la prueba del sistema de transmisión de energía con el regulador.

En la figura 5.27 se muestra la eficiencia del sistema respecto a la potencia de salida. Del análisis de los datos se tiene que se logra una eficiencia máxima de 55 % con 26,1 W de potencia de salida del sistema.

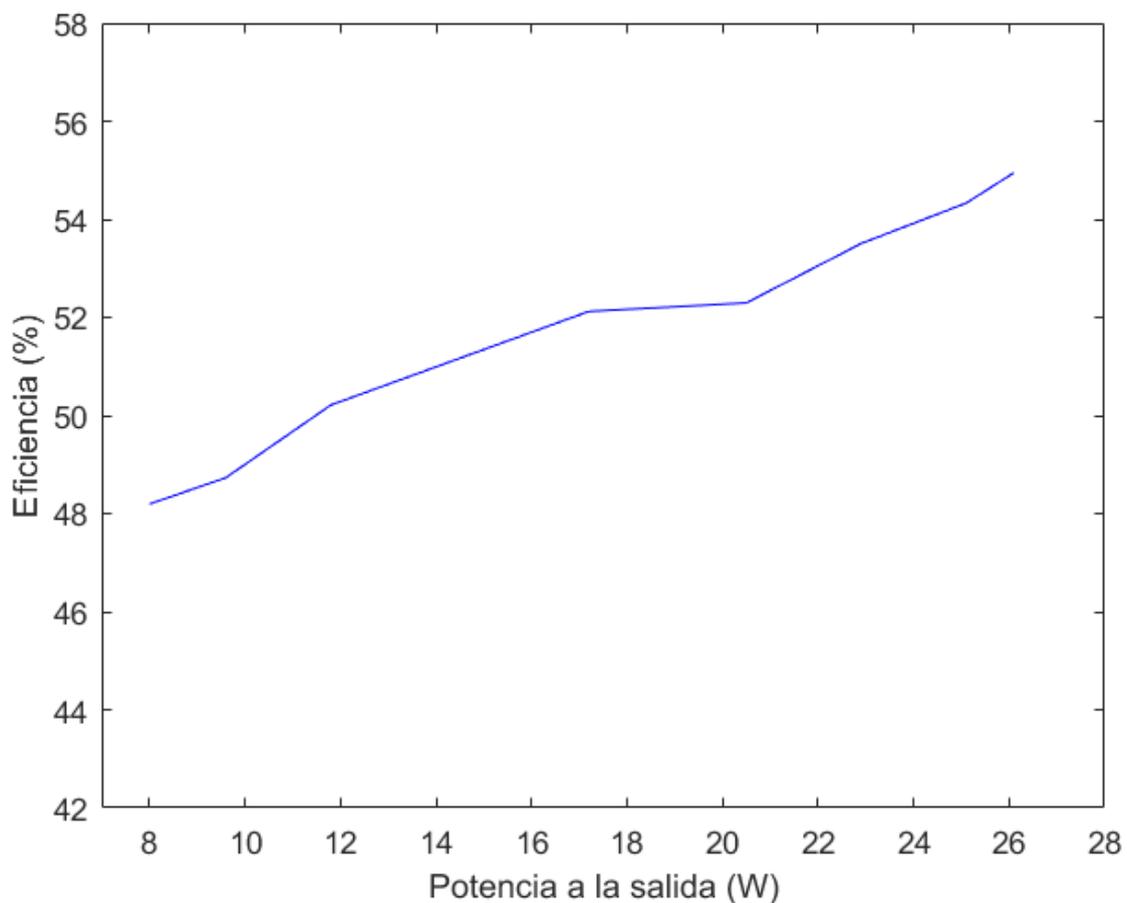


Figura 5.27: Eficiencia del sistema de recarga.

Por último, en la figura 5.28 se puede observar que con un voltaje de entrada mínimo de 19,5 V,

la potencia entregada por el sistema es suficiente para hacer funcionar a dos de los cargadores disponibles para recargar la batería (ver tabla 5.3).

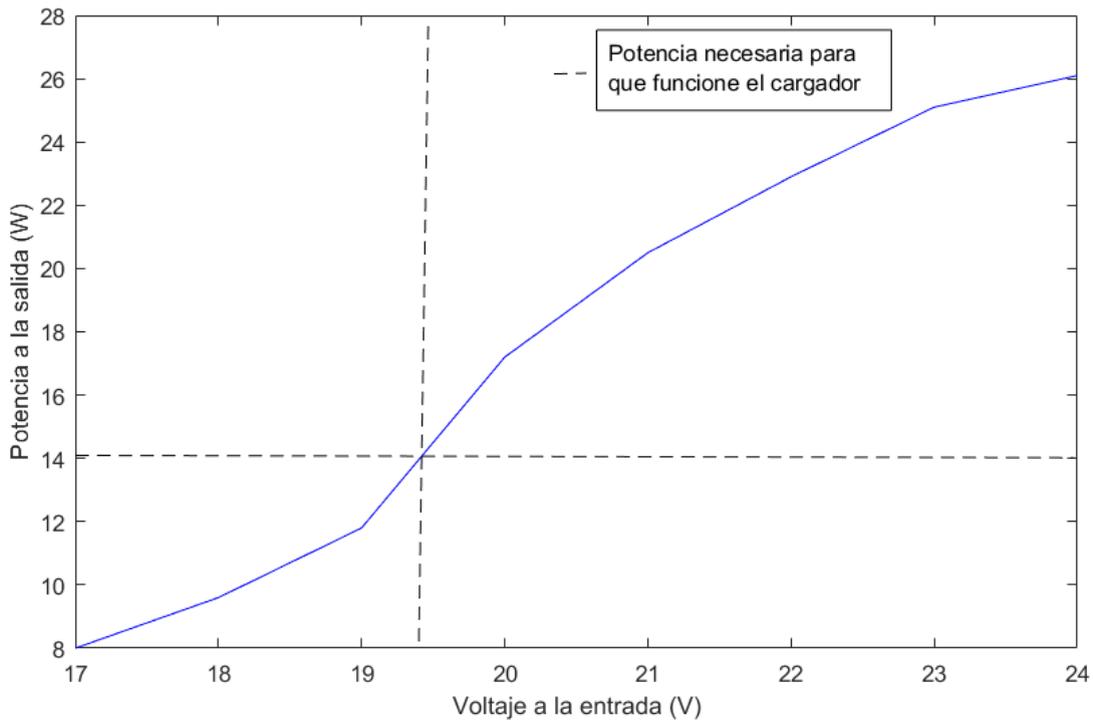


Figura 5.28: Potencia de salida vs voltaje de entrada.

5.5.3. Testeo del sistema TX/RX con regulador, cargador y batería

La etapa final de testeo del sistema de recarga, consiste en lograr recargar una batería LiPo utilizando el sistema de transmisión de energía diseñado²² junto al regulador de voltaje y el cargador.

Para realizar el test, se alimenta al sistema con 22 V y se registra el voltaje de batería durante el tiempo de carga²³. El diagrama del setup para la prueba se muestra en la figura 5.29.

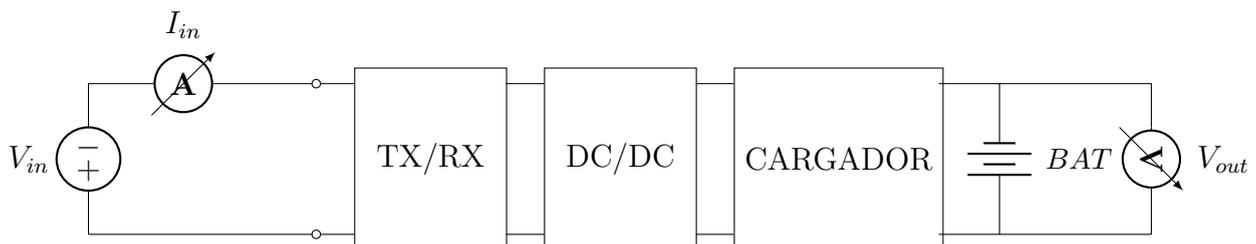


Figura 5.29: Diagrama del setup de medida para el test.

²²El cargador utilizado en esta prueba es el Turnigy (16,8 W).

²³La batería está completamente cargada cuando su voltaje es 12,6 V.

Los resultados del test se muestran en la Tabla 5.11.

Vin (V)	Pin (W)	Tiempo (min)	Vbat (V)
22	20,7	1	11,36
22	19,6	5	11,38
22	20,7	18	11,41
22	16,6	20	11,44
22	15,4	40	11,51
22	13,4	80	11,66
22	12,1	120	11,86
22	11,8	150	12,25
22	12,1	210	12,52
22	11,6	230	12,56
22	13,2	260	12,60

Tabla 5.11: Resultados de la caracterización del sistema de recarga implementado.

Cabe mencionar que la diferencia encontrada en tiempos de carga respecto a las pruebas realizadas con el cargador solo (ver Tabla 5.8 corresponden a la diferencia de voltaje inicial de la batería (11.36 V vs 11.84 V).

Los resultados obtenidos muestran que la recarga resulta exitosa. La batería se cargó de forma completa desde un voltaje de 11,36 V en 4 horas y 20 minutos, cumpliendo con todos los requerimientos necesarios para su implementación en el dron.

En esta sección se realiza una descripción detallada de los módulos funcionales del dron, así como de los componentes que lo conforman y su interconexión. El diagrama de capas de este sistema se puede ver en la figura 6.1.

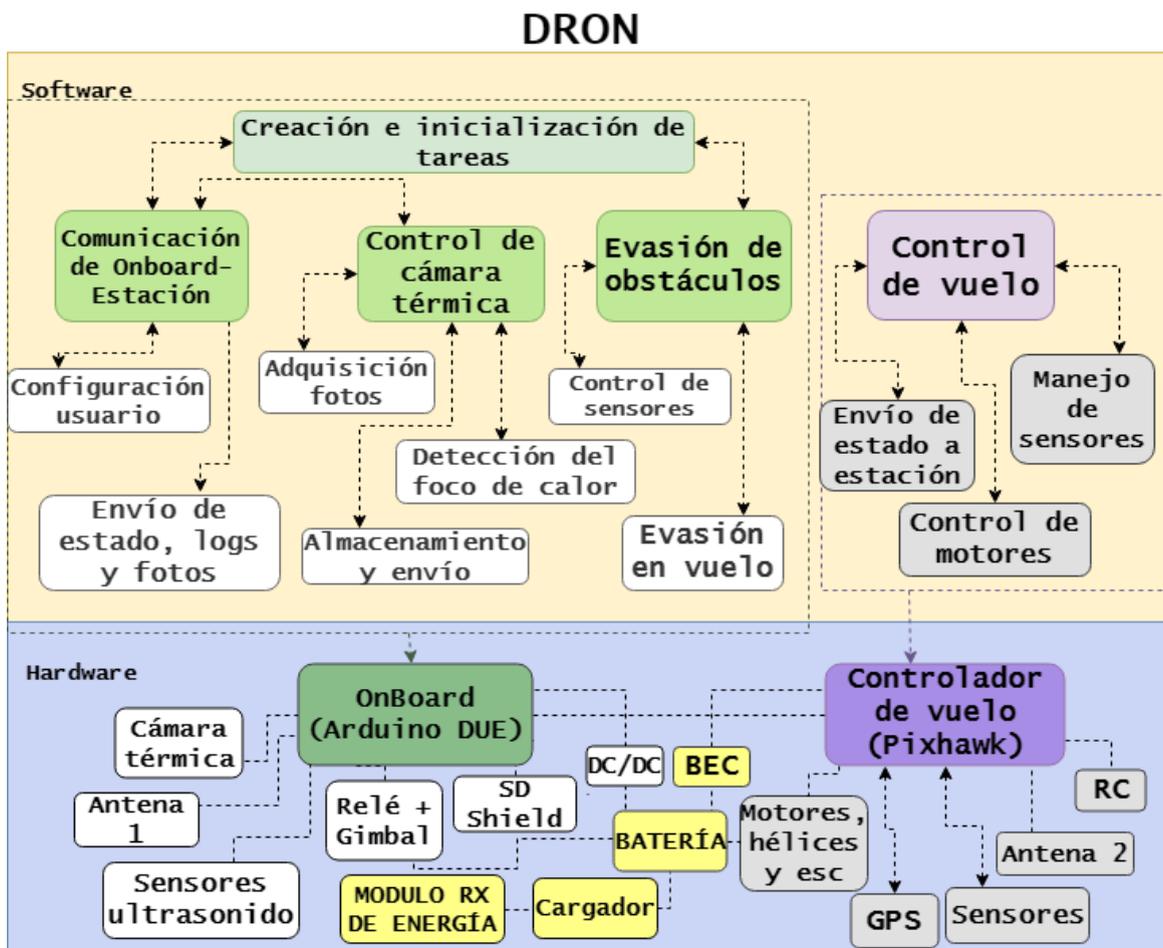


Figura 6.1: Diagrama de capas del dron.

6.1. Hardware

Los componentes utilizados para implementar el dron son los siguientes:

- Sistema receptor de la recarga inalámbrica.
- Controlador de vuelo: Pixhawk v1
- Receptor GNSS diferencial: Ublox Neo-M8N GPS con Compass
- Radio telemetría: 3DR de 915 MHz
- ESC¹: 30A Brushless
- Radio RC Turnigy 9X
- Motores: EMAX GT2215/12 con hélices 10x4.7 CCW.
- Gimbal: Storm 32 v0.9
- BEC genérico
- Batería: LiPo 5Ah, 50C, 3 celdas.
- OnBoard: Arduino DUE
- Sensor de distancia: HC-SR04x
- Cámara térmica: FLIR LEPTON 80x60
- Shield SD
- Radio telemetría: 3DR de 433 MHz

El esquema de conexión de estos componentes se puede ver en la figura 6.2. A continuación se realiza una breve descripción de cada componente.

¹Electronic Speed Controller

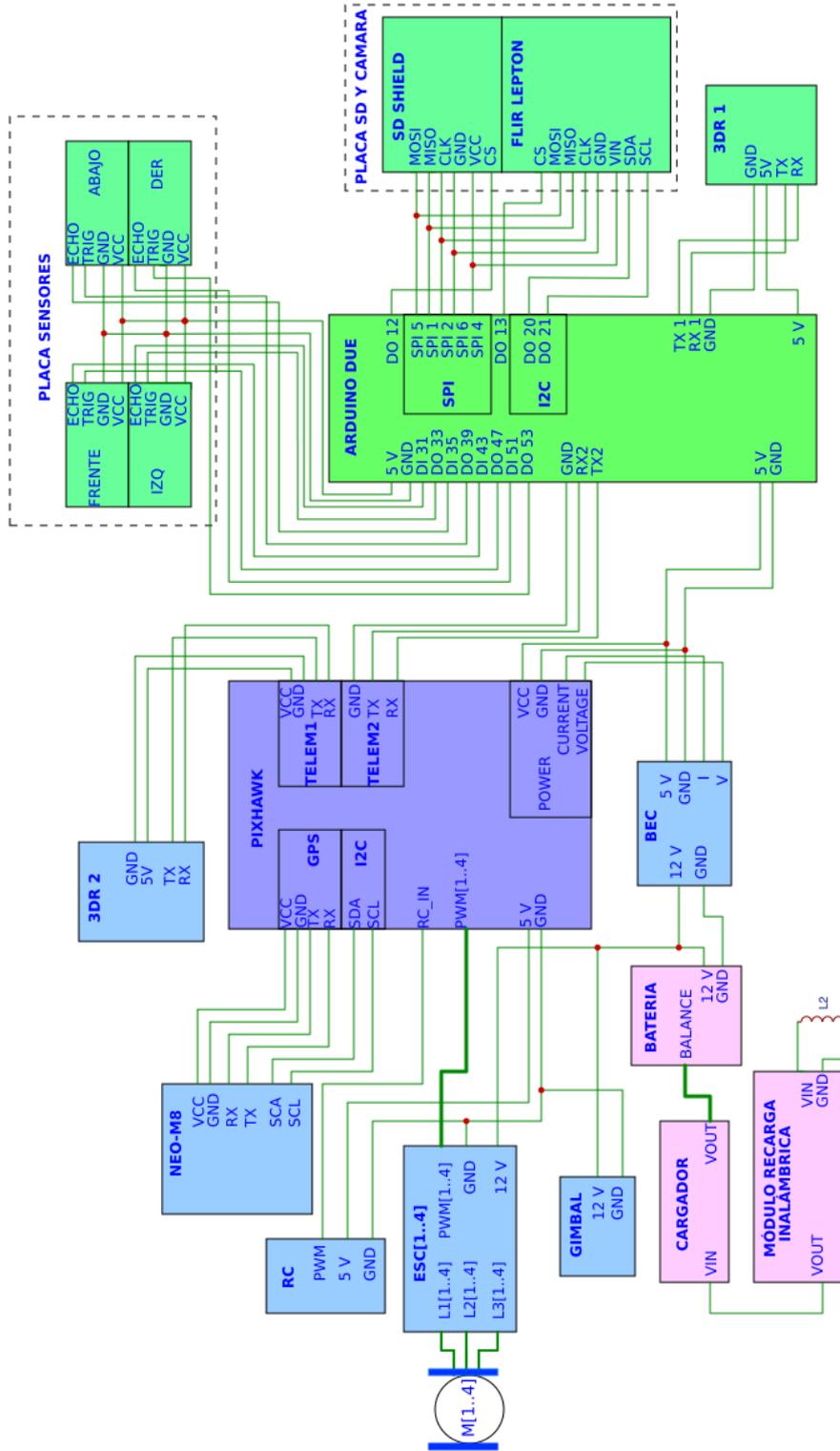


Figura 6.2: Diseño esquemático de conexiones de componentes del Dron

6.1.1. Controlador de vuelo

El Controlador de vuelo utilizado es el Pixhawk V1.0 mostrado en la figura 6.3. El controlador es el encargado de manejar todos los componentes del dron para lograr la ejecución de un vuelo.



Figura 6.3: Controlador Pixhawk

Para establecer este control, el Pixhawk contiene un firmware específico. En los últimos años, se ha incursionado en la actualización de este firmware, creándose dos ramas, una llamada Ardupilot, y la otra PX4. Estas ramas ofrecen diferentes funcionalidades y formas de controlar al dron. Las características de ambas ramas se muestran en la Tabla 6.1.

	Ardupilot	PX4
Versiones (últimas)	3.6.4 estable	1.8.2 estable
Capacidad de simulacion	Software in the loop	Software in the loop
Licencias	GPL ² Se deben mantener públicos los cambios realizados	BSD ³ No existe obligación de publicar cambios realizados
Soporte	Comunidad amplia de desarrolladores Foros de consulta activos	Desarrollo privado. Foros de consulta limitados
Comandos de control disponibles	Comandos de velocidad y posición relativa al Dron	Comandos de posición global relativos a GPS
Modos de vuelo	AUTO: Control de misión por GPS GUIDED: Control de movimiento relativo	MISSION: Control de misión por GPS STABILIZED: Control por RC ⁴

Tabla 6.1: Comparación entre las opciones de Firmware para Pixhawk.

El sistema de Termodron 1 contaba con el firmware de PX4 v1.6.3. Sin embargo, a partir de la comparación (Tabla 6.1), se encontraron varias oportunidades de mejora al utilizar el firmware de Ardupilot.

²General Public License

³Radio Control

⁴Berkeley Software Distribution.

En primer lugar, ambas versiones de firmware pierden la capacidad de simulación de Hardware in the Loop (HITL), el cual permite simular todos los sensores y su conexión al Controlador de vuelo mediante un software de PC. Esta pérdida es la principal razón por la cual no se actualizó el firmware en Termodron 1.

Como contrapunto, aunque las dos versiones de firmware nuevo poseen características interesantes, la de Ardupilot dispone de un control más fino sobre cada movimiento del dron, y tiene una comunidad de soporte mucho mayor.

Por lo mencionado anteriormente y dada la relevancia de establecer un control fino sobre los desplazamientos del dron para la implementación de la evasión de obstáculos, se decide utilizar el firmware de Ardupilot v3.6.4.

Para calibrar y cambiar los parámetros del Pixhawk con el nuevo firmware, se utilizan los programas Ground Control Station y Mission Planner. Ambos permiten establecer la conexión con el Controlador de vuelo, y en el caso de Mission Planner, permite la inspección de la comunicación Dron-Estación de Monitoreo.

Para simular el comportamiento del Controlador de vuelo y la respuesta a diferentes comandos, se utiliza el software de ArduCopter junto a MavProxy. Este sistema de simulación es imprescindible a la hora de testear los comandos necesarios para implementar la evasión de obstáculos.

6.1.2. OnBoard

Para la OnBoard, se continua utilizando un Arduino DUE (figura 6.4). Esta placa permite la ejecución de todas las funciones a implementar sobre el dron. Así mismo, permite la conexión del Shield SD y los sensores de ultrasonido.



Figura 6.4: Placa Arduino DUE

A partir de la evaluación del sistema implementado por Termodron 1 se concluye que la memoria y los tiempos de respuesta del Arduino DUE son suficientes para el correcto funcionamiento del dron. Se tiene en cuenta la posibilidad de la utilización de una Raspberry en vez de un Arduino, pero se tiene como desventaja que funciona con un sistema operativo, el cual es mucho más sensible a errores en tiempos de ejecución. Además, la simplicidad del funcionamiento del Arduino lo hace ideal para proyectos orientados al control de hardware, como lo es este.

6.1.3. Antenas de telemetría

El sistema original de comunicación del dron contenía una única antena de telemetría sobre el dron, donde según la necesidad, establecía la comunicación OnBoard-Estación de Control o Controlador de vuelo-Estación de Control por medio de un buffer triestado. De lo visto en el capítulo 4, se concluye que este tipo de implementación produce grandes retrasos en la comunicación causados por el buffer. A partir de esto es que se identifica la oportunidad de realizar una mejora en este sistema.

Se identifican dos formas de implementar mejoras:

- Remover el buffer, conectar la antena directo al Controlador de vuelo y por medio de la conexión Controlador de vuelo-OnBoard existente, realizar la comunicación OnBoard-Estación de Control. En este caso la Pixhawk rutea los mensajes que llegan desde la estación fija hacia la OnBoard.
- Colocar dos antenas independientes sobre el dron, la primera conectada al Controlador de vuelo y la segunda a la OnBoard.

A partir de la evaluación de la primer opción se encuentra que el controlador es capaz de redirigir mensajes desde la OnBoard hacia la estación. Sin embargo, cuando se intenta hacer el camino inverso, y recibir mensajes en la OnBoard enviados desde la GCS, no se logra, pese a varios intentos.

Debido a los resultados de la etapa anterior, es que se decide implementar la segunda opción, y colocar dos antenas independientes sobre el dron. La colocación de ambas antenas genera además un sistema más robusto de comunicación con el dron. Una de las antenas se conecta al controlador de vuelo y la otra a la OnBoard.

Para colocar dos antenas de telemetría sobre el dron, es necesario tener en cuenta los efectos de interferencia que pueden generarse, ya que las mismas se encuentran muy próximas.

Por esta razón, es que se decide utilizar dos módulos de telemetría con frecuencias diferentes. La especificación de las antenas elegidas se puede ver en la tabla 6.2.

	Modelo	Frecuencia (MHz)	Alcance (km)	Potencia de transmisión	Transmite MavLink
Antena 1	3DR	915	1,5	100mW	Si
Antena 2	3DR	433	2,0	100mW	Si

Tabla 6.2: Características relevantes de las antenas elegidas.

La antena con mayor alcance, es la que se utiliza para establecer la comunicación con el controlador de vuelo, ya que es imprescindible que el mismo pueda recibir la misión desde la estación de control. Las pruebas realizadas para definir el alcance real y el ruido entre ambas antenas se pueden ver en la capítulo 8.

6.1.4. GPS

El GPS usado es el mismo que el utilizado en Termodron 1, siendo un receptor de GNSS⁵ marca U-blox NEO-M8 [19] el cual soporta DGNSS⁶ pudiendo brindar una mayor exactitud en la posición debido a la recepción de datos para la ejecución de la corrección diferencial (ver anexo B.3 para más detalle).

Para poder realizar esta corrección, se debe enviar desde la estación de monitoreo hacia el Controlador de vuelo la información necesaria.

6.1.5. Radio

El radio permite establecer una comunicación directa con el control de vuelo, para que en el caso de fallas del sistema, se pueda tener un control directo sobre el movimiento del dron⁷. El radio utilizado en este caso consiste en un Turnigy TGY9X (figuras 6.5 y 6.2), que trabaja a 2.4 GHz y contiene su correspondiente receptor en el dron (ver figura A.2).



Figura 6.5: Sistema de radio utilizado

6.1.6. Motores, hélices y ESCs

Como se menciona en el capítulo 4, los motores utilizados sobre el dron originalmente poseen un thrust de 745 g cada uno. Con esos cuatro motores, el dron alcanza un thrust de 2980 g. Teniendo en cuenta la modificación del dron realizada, se obtiene un peso final de 2469 g, obteniendo así una relación thrust-peso $TWR = 1,2$.

Se recomienda que un dron posea un thrust de el doble de su peso para que maniobre fácilmente ($TWR = 2$). Debido a esto, es que se decide realizar la compra de nuevos motores con mayor thrust y así poder llegar a una relación cercana a $TWR = 2$.

Se realiza una evaluación de los motores disponibles en el mercado. El resumen de las opciones encontradas se muestra en la tabla 6.3.

⁵Sistema global de navegación por satélite. Incluye diferentes sistemas de navegación, entre ellos el GPS.

⁶Sistema de navegación por satélite diferencial. Se basa en la mejora del clásico GNSS implementado con satélites mediante la adición de una red de referencia terrestre.

⁷Este componente no es parte del sistema autónomo, pero es de gran importancia en caso de emergencia.

Modelo	Thrust (g)	Consumo (A)	Hélice (")
EMAX CF2822/12	745	14,5	10x4,7
EMAX BL2215/25	950	16,5	10x4,7
EMAX GT2215/09	1250	26,0	10x4,7
EMAX GT2215/12	1000	15,0	10x4,7

Tabla 6.3: Elección de motores para el dron.

A partir de la evaluación de los motores se encuentra que los motores con mayor thrust, menor consumo, y peso bajo, que cumplen las necesidades de este proyecto son los Emax GT2215/12 (ver 6.6).

Con estos motores, el dron posee un thrust de 4000 g. Considerándose el peso final (2469 g), se obtiene un $TWR = 1,62$, lo que significa una clara mejora para el desplazamiento.



Figura 6.6: Motor Emax GT2215/12.

Las hélices recomendadas y utilizadas para este tipo de motores son las de tamaño 10x4.7 pulgadas y de fibra de carbono.

Por último, se necesita un controlador para los motores, para lo que se utilizan ESCs de 30 A, más que suficiente considerando el consumo máximo de estos motores (15A).

6.1.7. Gimbal

La cámara utilizada es la encargada de detectar puntos calientes. La misma debe apuntar al suelo incluso con el dron en ángulos no paralelos al mismo y rotar en los ángulos roll y pitch (ver figura 6.7).



Figura 6.7: Ángulos del gimbal.

Con este tipo de gimbal, se obtiene mayor control de la cámara y por lo tanto, mejores fotos. Sin embargo, estos gimbal tienen una desventaja importante y es que están diseñados para cámaras pesadas (GoPro). Poner una cámara más liviana, hace que el centro de masa del sistema cambie, y por ende, a los motores se les dificulte más lograr una posición centrada. La única solución a este problema es aumentar el peso de la cámara que se coloca y por tanto, el peso total del dron. El peso de estos gimbal, incluyendo una cámara normal, oscila entre 300 y 400 g.

De todas formas, se estudian las tecnologías disponibles para elegir el gimbal a utilizar. De esta investigación surgen dos tipos de gimbal, los de tres y los de dos ejes. Debido a la poca diferencia de peso y a que el de tres ejes agrega un eje adicional de control, se decide comprar el modelo HACKRC STORM 32 3 AXIS de tres ejes.

6.1.8. Sensores de distancia

Los sensores de distancia utilizados por Termodron 1 (USPRO US-015) se cambian por otros correspondientes a un modelo más nuevo (HC-SR04 [20]). La tecnología sigue siendo la misma, con especificaciones de igual alcance y consumo. Sin embargo, se verifica que los nuevos sensores proveen lecturas más exactas, no son tan sensibles a vibraciones y ruido y poseen mayor alcance que los anteriores.

6.1.9. Cámara infrarroja y Shield SD

La cámara utilizada es la original utilizada por Termodron 1. La misma posee un rango de temperatura óptimo de -10 a 65 °C [21] y un ángulo de apertura (FoV) horizontal de 51° y vertical de 37.1° , lo que se traduce en una determinada área de cobertura (ver figura 6.8), dependiendo de la altura.

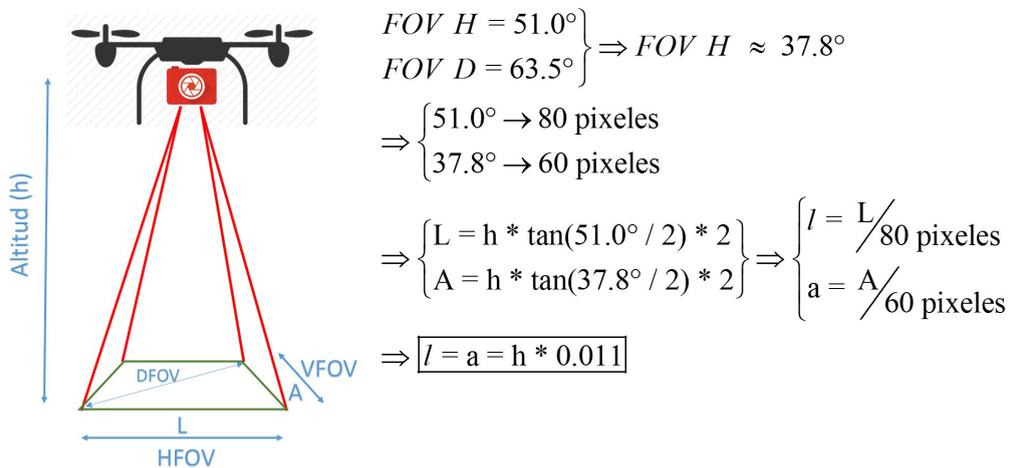


Figura 6.8: Cálculo del área de apertura de la cámara⁸

Las fotos tomadas por la cámara son almacenadas en un shield SD [22]. El shield es el mismo que el utilizado en Termodron 1 y se comunica con la OnBoard por SPI.

6.1.10. Batería, reguladores y distribuidor

La alimentación de los componentes del dron se realiza con una batería LiPo de 3 celdas (3.7 V nominal x celda), de 5 Ah y 50 C. Para distribuir la energía entre todos los componentes, el sistema cuenta con un distribuidor de energía.

Por último, se cuenta con un BEC (Battery Eliminator Circuit) que transforma de 12 V a 5 V, capaz de sensar la corriente y voltaje de la batería. El mismo es utilizado para alimentar al Controlador de vuelo (Pixhawk). Además, para poder alimentar a la OnBoard de forma independiente, se utiliza un regulador de voltaje LM2596 (12 V a 5V).

⁸Imagen obtenida de [2].

6.2. Software

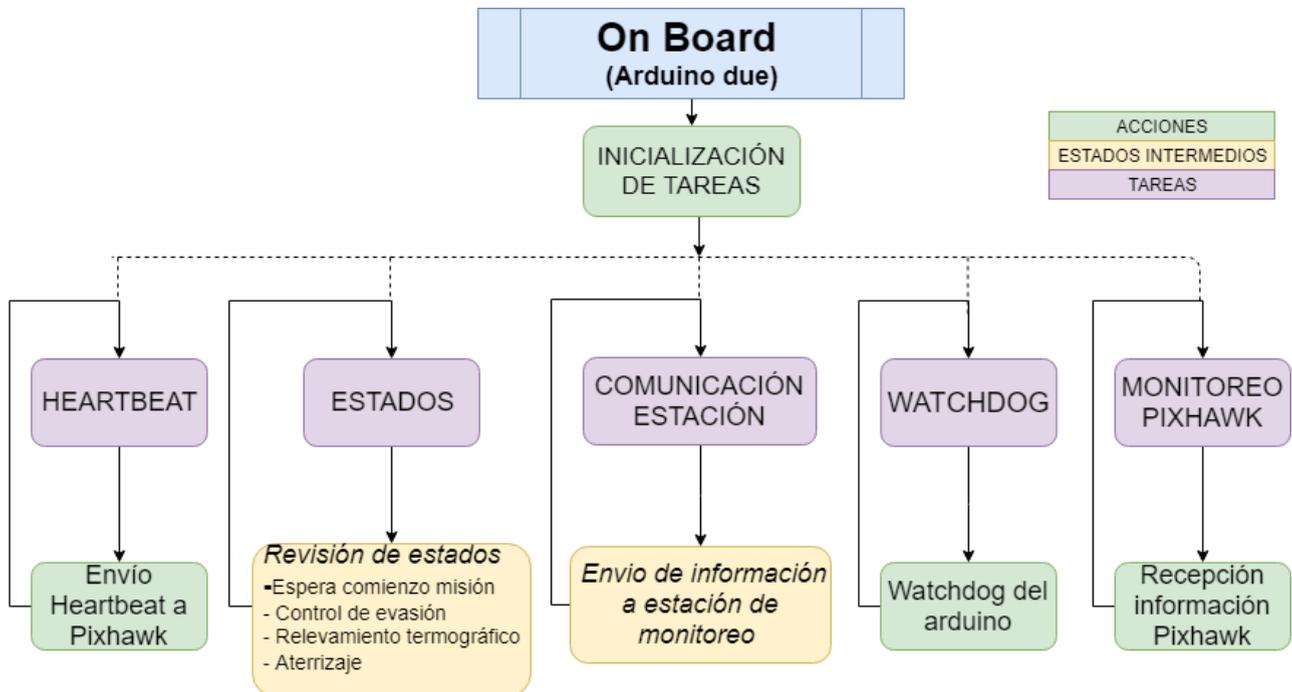


Figura 6.9: Esquema de tareas implementadas del software.

Un esquema general del software implementado en la OnBoard (OnBoard) se puede ver en la figura 6.9. A continuación se realiza una descripción de las funciones principales del dron. Para más detalle en la realización de estas funciones, ir al anexo C.

6.2.1. Control de vuelo

El control de vuelo del dron es implementado por el Controlador de vuelo Pixhawk, que utiliza el firmware Ardupilot para realizar las diferentes funcionalidades disponibles durante el mismo.

Para realizar el vuelo, el Controlador de vuelo lee de sus puertos la información proveniente desde los diferentes sensores y los canales de comunicación y ejecuta la misión precargada por el usuario.

Una vez que se ejecuta la misión, los únicos comandos que pueden cambiar la ejecución de la misma son los provenientes desde la OnBoard para la evasión de obstáculos, o los comandos de emergencia Land o Return to Launch provenientes desde la estación de control.

6.2.2. Sistemas de comunicación

Un esquema del sistema de comunicación del dron se muestra en figura 6.10. Dicho sistema cuenta con tres vías diferentes:

- Comunicación serial OnBoard-Controlador de vuelo.

- Comunicación por telemetría OnBoard-Estación de Control.
- Comunicación por telemetría Controlador de vuelo-Estación de Control.

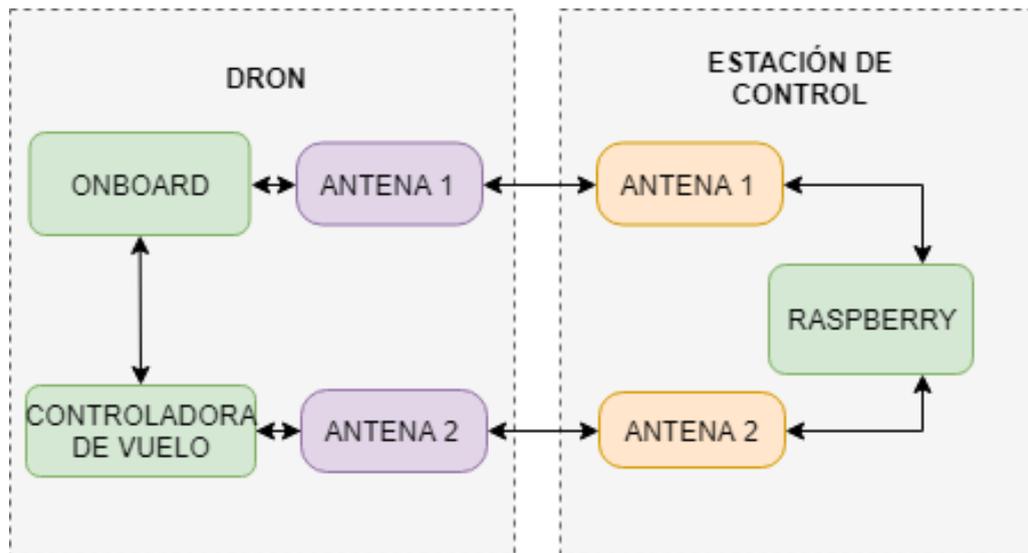


Figura 6.10: Esquema del sistema de comunicación del dron con la base

El detalle de la comunicación entre el controlador de vuelo y la estación depende sólo de la estación y se describe en la sección 3.2.4 del capítulo 7.

Para la comunicación de la OnBoard con la Pixhawk se utiliza una comunicación serial de 115200 bits/s. Mientras que en el caso de la comunicación con la estación de monitoreo se realiza mediante las antenas de telemetría con un baudrate de 57600 bits/s.

En el software implementado en la OnBoard, la comunicación no presenta un loop definido sino que se generan los canales para que se envíe la información cuando otros procesos deban usarlos. En el caso de la comunicación con el Controlador de vuelo, la misma se establece para obtener la información del vuelo constantemente y para ejecutar comandos correspondientes a la evasión de obstáculos. Mientras que por el lado de la comunicación con la estación, se establece un algoritmo Round-Robin que consulta periódicamente si existe información que se deba enviar. El loop de estados (descrito en la sección 6.2.3) habilita las flags una vez que haya información disponible para enviar.

6.2.3. Estados

El control de las funciones principales realizadas por el dron se hace a partir de la tarea Estados, implementada como se muestra en la figura 6.11. Esta tarea maneja las funciones principales del dron, como son la evasión de obstáculos, el seteo de misión, el relevamiento de puntos calientes y el aterrizaje preciso.

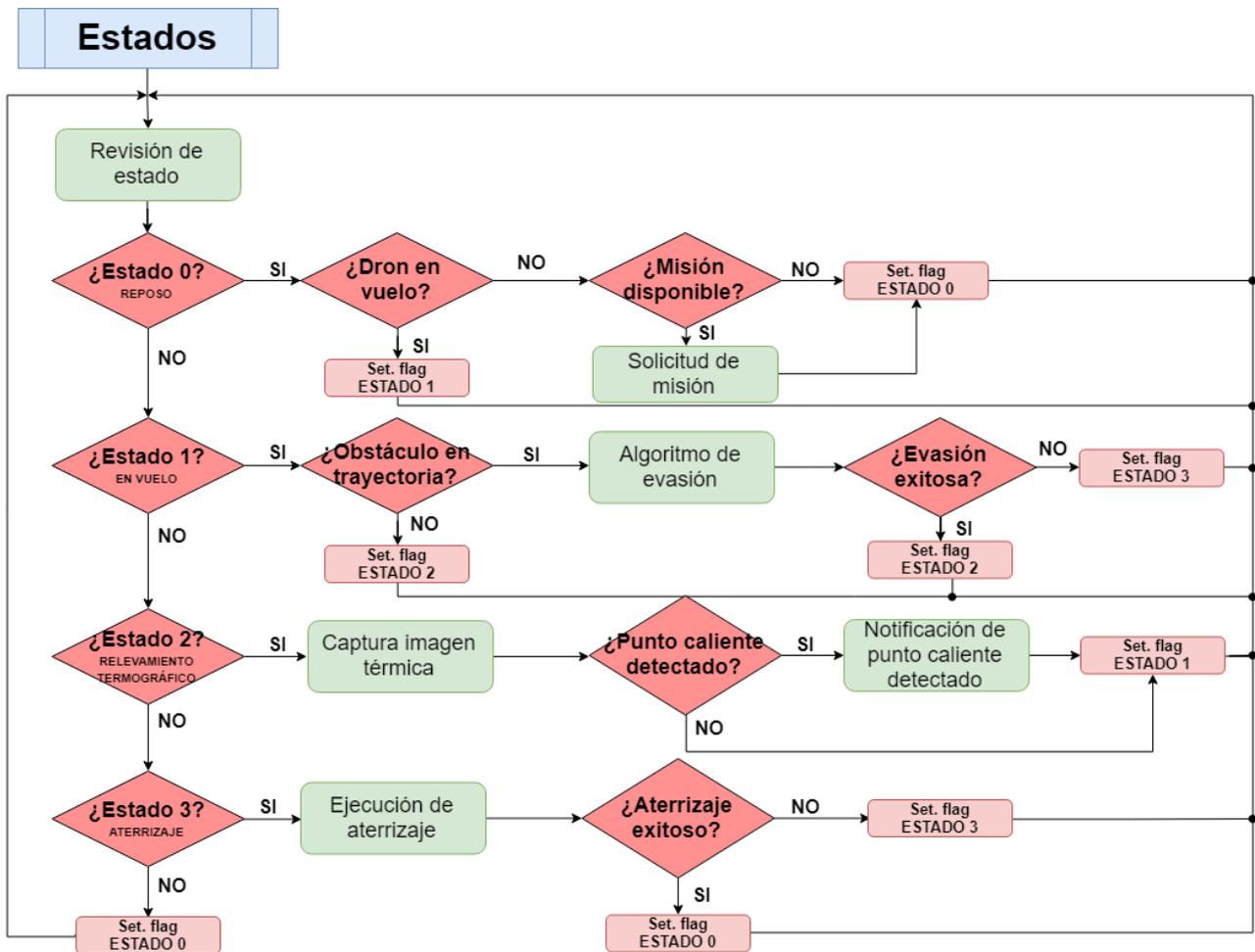


Figura 6.11: Diagrama de transición de estados.

El estado inicial siempre es el Estado 0 donde se realiza una verificación de las condiciones del dron. Si el dron no está en vuelo, ejecuta un control para saber si existe una misión precargada. El Estado 0 solo cambia si se detecta que el dron comenzó una misión.

Evasión de obstáculos y toma de fotos

Una vez que el dron comienza la misión y está en vuelo, el estado principal es el Estado 1, donde se realiza la detección de obstáculos.

En el caso de no detectar un obstáculo delante, el dron pasa al Estado 2, donde toma una fotografía y detecta el foco de calor en la misma. Por el contrario, si se detecta un objeto delante, el dron releva los sensores laterales para verificar qué acción realizar. Si en los laterales no se encuentran objetos, por defecto se mueve hacia la izquierda. Este comando de movimiento se realiza hasta que se cumpla una de las siguientes condiciones:

- Los sensores dejen de detectar el objeto delante, por lo que se considera que evadió el objeto detectado y se continúa la misión.
- El dron detecte un objeto a la izquierda, por lo cual se moverá en el sentido opuesto.

- Cumpla el tiempo máximo de evasión y comience a dirigirse hacia el sentido opuesto por un tiempo máximo el doble de grande.

En el caso de detectar dos objetos consecutivos hacia ambos lados, la misión se considera imposible de realizar y se ejecuta el regreso a la base.

El Estado 2 tal como se menciona, controla la cámara y realiza el análisis de los datos obtenidos. Una vez detectado un foco de calor, se guarda la foto. En el caso de que el usuario configure la opción del envío continuo de imágenes, cada imagen es enviada a la estación.

Mientras se lleva a cabo la misión se ejecutan los Estados 1 y 2. El Estado 3 se encarga del aterrizaje. Una vez que el dron llega al último punto de la misión se ejecuta el algoritmo de aterrizaje preciso que fue desarrollado utilizando la cámara disponible y se detalla a continuación.

Aterrizaje preciso

Al diseñar el aterrizaje preciso se busca aprovechar las capacidades preexistentes en el dron. Esto se traduce a la asistencia del aterrizaje utilizando la cámara térmica y el algoritmo de búsqueda de cuerpo caliente.

Con eso en mente, se crea una función que supone la preexistencia de una foto y la utilización del algoritmo de búsqueda en la misma. Dicha función utiliza los valores correspondientes a las coordenadas de la baliza dados por el algoritmo y divide los píxeles de la foto en 9 zonas a las cuales se les predefine una acción (ver figura 6.12).

El proceso de aterrizaje funciona de la siguiente manera: una vez que el dron se encuentra a menos de 5 metros de la base, se realiza la lectura de altura con el sensor de distancia de ultrasonido. Si esta distancia es menor a la mínima establecida para la detección de la baliza, se procede a tomar una foto. A continuación se aplica el algoritmo de búsqueda de cuerpo caliente con umbrales específicos para el aterrizaje. Si se detecta la baliza, se ejecuta la función creada determinando así la acción a tomar. Una vez ejecutada dicha acción, se vuelve a repetir el mismo proceso desde el comienzo. El aterrizaje termina cuando se alcanza el cero establecido como altura de reposo del dron.



Figura 6.12: División de zonas en la imagen.

En caso de no detectarse a la baliza en la zona de interés, el algoritmo de búsqueda arroja coordenadas 0,0 y se define una acción aparte para este caso.

Si el centro de la baliza se ubica en la zona 5 la acción a realizar es descender, por lo que siempre las acciones en el resto de las zonas apuntan a centrar al dron respecto de la baliza.

6.3. Armado final del sistema

Como se menciona en la sección de hardware, debido a los cambios de componentes y agregado de otros al dron, se reorganiza el mismo para ubicar todos los componentes de la forma más eficiente. Los componentes nuevos a agregar al armado del dron son los siguientes:

- Placa con los sensores.
- Placa que contiene a la cámara y shield SD.
- Sistema de recarga inalámbrica.
- Nuevo frame para el aterrizaje.

A continuación se realiza una breve descripción del armado de cada componente y el armado final del dron.

Placa de sensores

Para colocar los sensores sobre el dron, se construye una placa específica que los sostenga e implemente el conexionado hacia la OnBoard. Esta placa está pensada para proveer a los sensores de mayor estabilidad y menor susceptibilidad a las vibraciones durante el vuelo, las cuales, como se verificó, causan medidas erróneas en los sensores. La placa es realizada en acrílico y cobre. El resultado final se observa en la figura 6.13.



Figura 6.13: División de zonas en la imagen

Placa de cámara y shield SD

Como se menciona en la sección de Hardware, el dron cuenta con una cámara infrarroja Flir Lepton y un shield SD para el almacenamiento de las fotos tomadas. Para su conexión al dron, y debido a que ambos componentes comparten varios pines, en particular, la comunicación SPI (ver conexiones en la Tabla 6.4 y figura 6.14), se implementa una placa para su conexión a la OnBoard. La misma se muestra en la figura 6.15.

Conector en Cámara FLIR	Conector en Arduino	Conector en Shield SD	Conector en Arduino
CS	PIN 10	CS	PIN 5
MOSI	SPI 5	MOSI	SPI 5
MISO	SPI 1	MISO	SPI 1
CLK	SPI 2	CLK	SPI 2
GND	SPI 6	GND	SPI 6
VIN	SPI 4	VCC	SPI 4
SDA	PIN 20	-	-
SCL	PIN 21	-	-

Tabla 6.4: Pines compartidos entre la cámara lepton y el shield SD y su conexión correspondiente en la OnBoard.

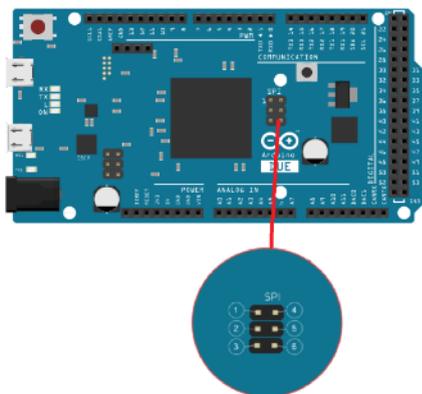


Figura 6.14: Conexión SPI en la OnBoard.

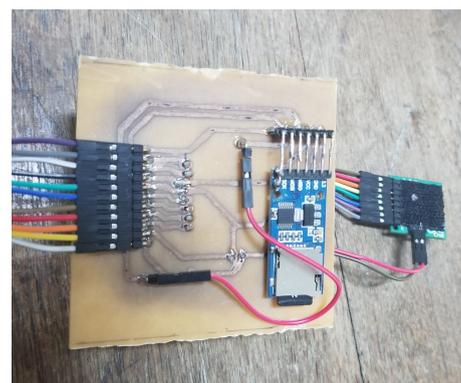


Figura 6.15: Placa con conexiones de la cámara y el módulo SD.

Sistema de recarga inalámbrica

El sistema de recarga sobre el dron está pensado para incluir una o dos bobinas de recepción sobre el mismo (dependiendo de la potencia requerida sobre el dron, se puede colocar más de una). Estas bobinas se deben colocar en la parte inferior del dron para poder lograr la distancia de carga necesaria con las bobinas de transmisión.

Al lado de cada bobina, se colocan los módulos de recepción junto a los reguladores de voltaje y mediante un cable, se energiza el cargador colocado al lado de la batería.

Tanto los módulos como las bobinas se colocan sobre bases diseñadas especialmente con este fin. El armado del sistema final de recarga se muestra en la figura 6.16.

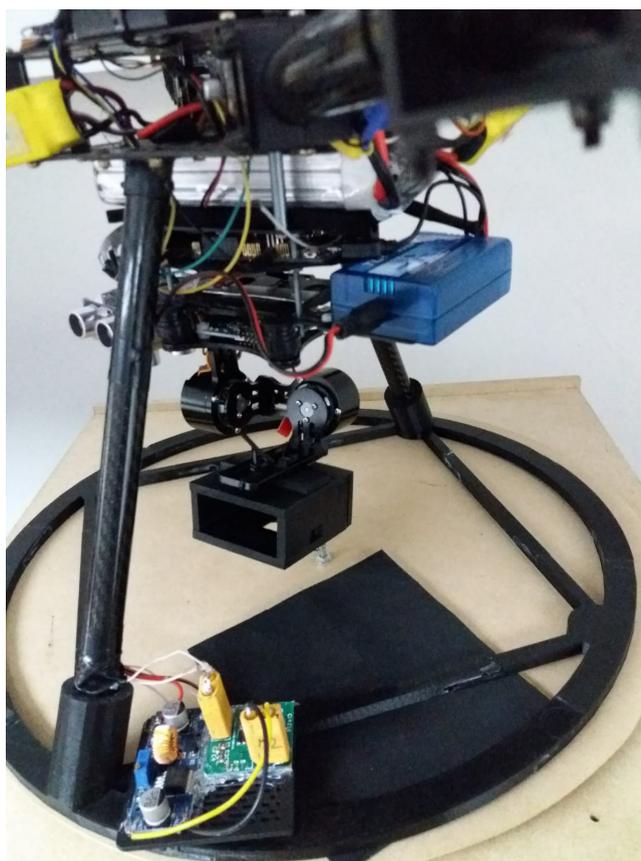


Figura 6.16: Dron con el sistema de recarga implementado

Nuevo frame para el aterrizaje

A partir del diseño de la recarga, surge la necesidad de generar un sistema de apoyo para el dron que permita incluir las antenas de recarga y a su vez permita al dron aterrizar. A partir de esto, se identifica que el frame a diseñar debe cumplir con los siguientes puntos:

- Debe generar un apoyo para las antenas y proveer de asistencia al acople de la recarga.
- Debe ser liviano y resistente.

- Debe soportar el peso del dron (aprox 2.6 kg).

Teniendo en cuenta los puntos anteriores, se procede a realizar el diseño.

En primer lugar, se decide realizar un sistema de soporte circular, debido a que en conjunto con el diseño de la estación de control (ver capítulo 7) se cuenta con un sistema de acople simétrico y sencillo de acoplar.

En segundo lugar, para lograr un sistema liviano, se consideran materiales accesibles en precio y fáciles de manejar. Dentro de las mejores opciones se encuentran la fibra de vidrio, la fibra de carbono y el PLA (plástico biodegradable). Debido al costo elevado de los dos primeros y su dificultad para ser moldeados, se elige la utilización de PLA mediante la impresión 3D.

Por último, mediante la configuración de parámetros claves de la impresión 3D como lo son la densidad y el tipo armado, se puede obtener un material lo suficientemente resistente para soportar el peso del dron.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza un diseño de los apoyos para su impresión (ver figura 6.17). Una vez impreso, se coloca en el dron, comprobando que soporta el peso del mismo, como se muestra en la figura 6.18.

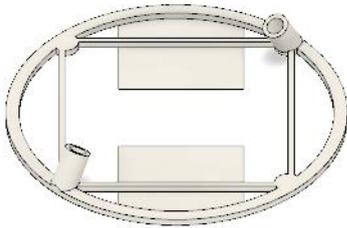


Figura 6.17: Diseño 3D de los apoyos.



Figura 6.18: Sistema de apoyo implementado.

CAPÍTULO 7

ESTACIÓN DE MONITOREO Y CONTROL

En esta sección se describen en detalle los módulos funcionales que conforman la estación de monitoreo y control. Esto incluye tanto la lógica de cada funcionalidad como los componentes necesarios para su implementación. El diagrama de capas de la estación se muestra en la figura 7.1.

ESTACIÓN DE MONITOREO Y CONTROL

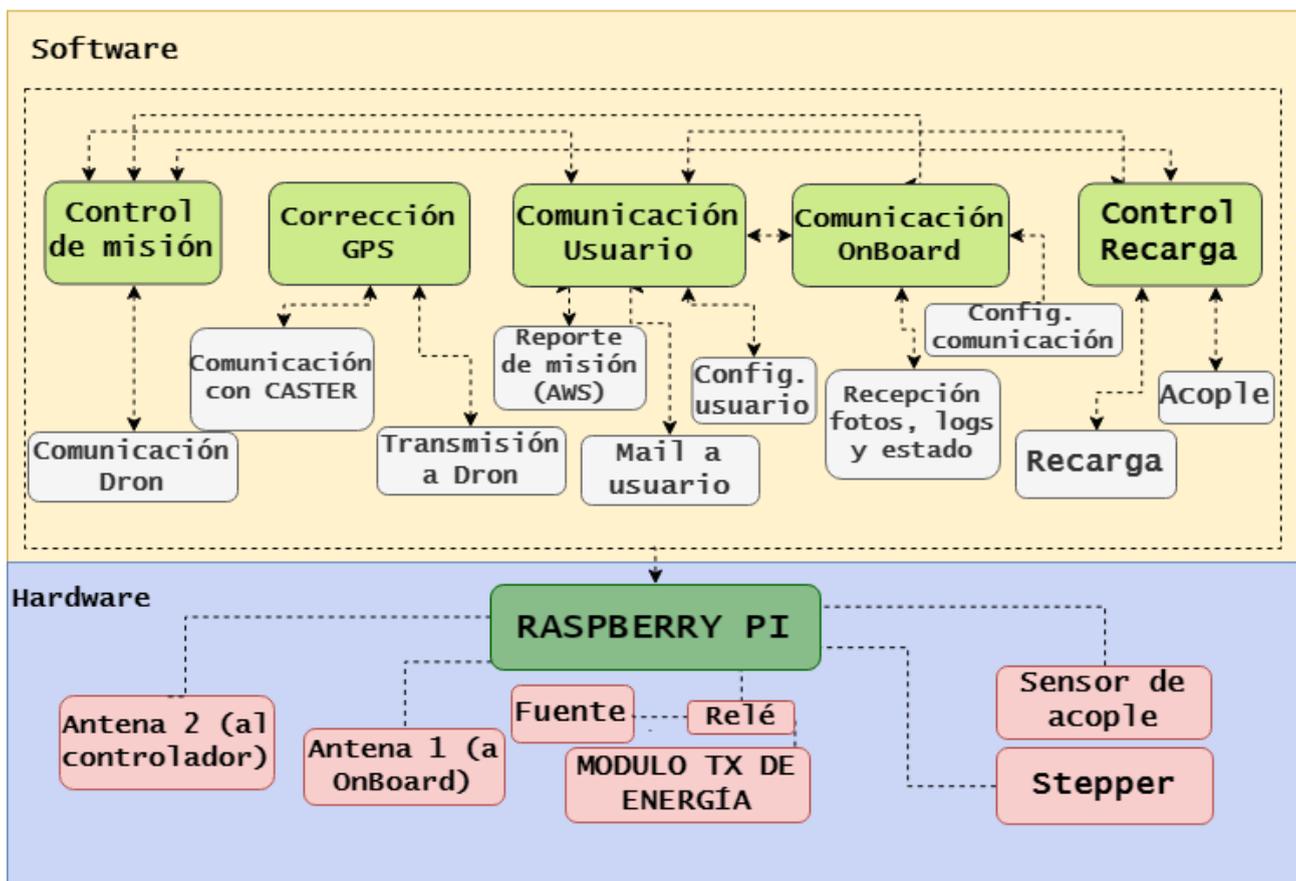


Figura 7.1: Diagrama de capas de la estación de monitoreo y control.

7.1. Hardware

Los componentes utilizados para implementar la estación de monitoreo y control son los siguientes:

- Módulo transmisor de la recarga inalámbrica.
- Centro de control: Raspberry PI.
- Antenas de telemetría: 3DR 915 MHZ y 433 MHZ.
- Sensor inductivo: LJ12A3-4-Z/BX. (NPN). [23]
- Relé: Songle 30VDC, 10A.
- Motor: Stepper nema 17.

El esquema de la interconexión de todos los componentes de la estación se muestra en la figura 7.2. A continuación se realiza una descripción de cada componente.

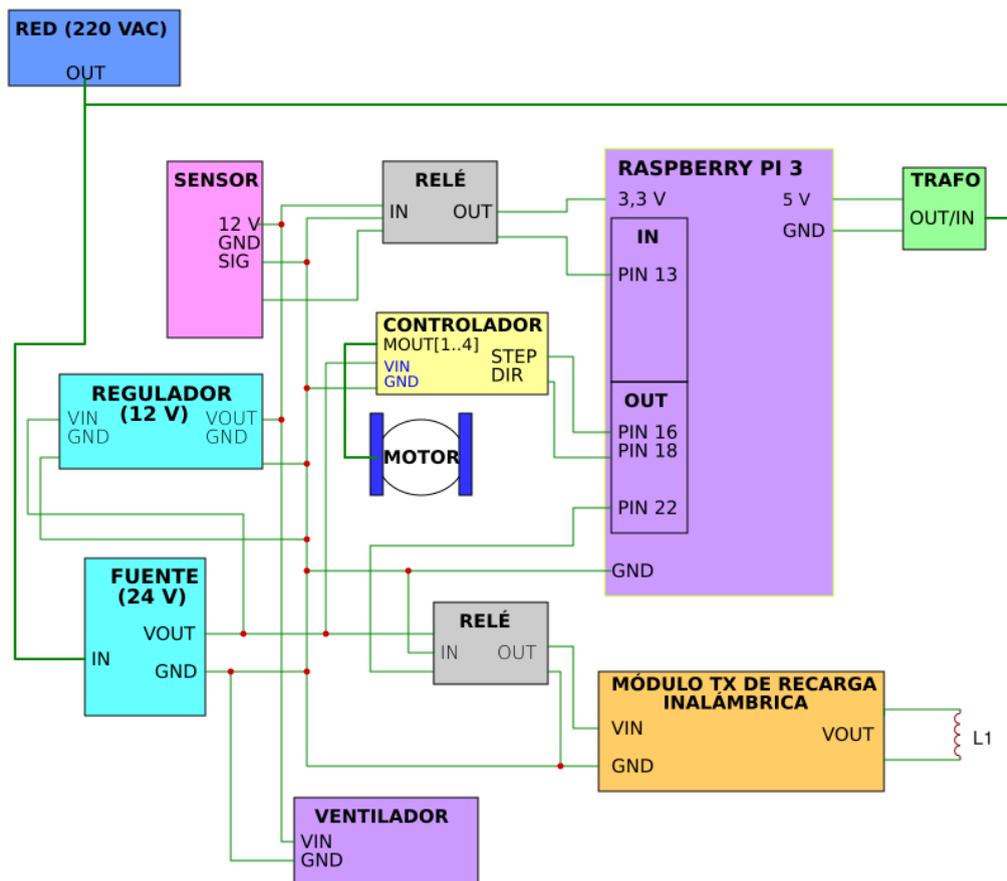


Figura 7.2: Esquemático de la estación de control

7.1.1. Raspberry PI

Con el fin de mejorar el sistema acorde al análisis previo se decide sustituir la placa Arduino por una Raspberry Pi 3 Model B+. En la tabla 7.1 se comparan las características principales para dar una idea cuantitativa de la mejora que representa.

Características Raspberry	Características Arduino
Broadcom BCM2837B0, quad-core Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @ 1.4GHz	AtmelARM Cortex-M3 @ 84 MHz
1GB LPDDR2 SDRAM	96KB SRAM
2.4GHz y 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE	-
Gigabit Ethernet sobre USB 2.0 (rendimiento máximo 300 Mbps)	-
40-pin GPIO	54 Digital I/O
	12 Entradas analógicas
	2 Salidas analógicas
HDMI de tamaño estándar	-
4 USB 2.0	1 USB OTG
Puerto CSI para conectar la cámara Raspberry Pi	-
Puerto DSI para conectar el display táctil Raspberry Pi	-
Puerto Micro SD para cargar el sistema operativo y almacenamiento de archivos	-
Sistema operativo: Raspbian	Programación en C/C++
Alimentación 5V/2.5A DC	Alimentación 5V DC

Tabla 7.1: Características de la Raspberry

Al comparar las características de ambas placas, resulta evidente que la Raspberry posee especificaciones mejor adecuadas al grado de exigencia requerido tanto para desempeñarse correctamente con las aplicaciones actuales como para brindar margen a futuras mejoras sin pérdida de rendimiento. Los cuatro núcleos del procesador y la memoria RAM de 1 GB, dan la oportunidad de desarrollar aplicaciones de gran cantidad de cómputo con procesamiento múltiple.

Otro punto muy importante a tener en cuenta es la posibilidad de conexión inalámbrica por Wifi y cableada mediante Ethernet de forma embebida, a diferencia del Arduino; características que son fundamentales para la cantidad de datos que se desean enviar y recibir.

Esta SBC (Single Board Computer) ya tiene un sistema operativo gratuito, basado en Debian y desarrollado específicamente para optimizar todo el hardware, el Raspbian. Contando con todos los beneficios de las distribuciones Linux, y realizada para maximizar los beneficios que aporta la Raspberry Pi, este sistema operativo ya trae más de 35.000 paquetes pre-compilados para

ayudar al desarrollo de la aplicación que se desea.

7.1.2. Antenas de telemetría

La comunicación se realiza por dos canales independientes, un cambio importante ya que genera mayor seguridad tanto en la información que es enviada como también por la redundancia en el control del sistema total. Las mismas establecen la comunicación desde la estación hacia la Pixhawk y la OnBoard.

Como se describe en la sección 6, se utilizan dos antenas, una de 915 MHz y otra de 433 MHz.

7.1.3. Sensor inductivo

Con el fin de asistir en el acoplamiento de las antenas, se utiliza un sensor inductivo de distancia LJ12A3-4-Z/BX (NPN) [23] el cual, complementado por un trozo de metal convenientemente colocado en los apoyos del dron, y conectado a la Raspberry Pi, determina cuándo las antenas se encuentran acopladas.



Figura 7.3: Sensor inductivo

La salida de este sensor es de tipo NPN normalmente abierto y se alimenta con 5 V. Al tratarse de un sensor sin contacto, su durabilidad es mayor a la de otros tipos de sensores como switches o interruptores mecánicos. Además, al ser un elemento completamente sellado, es muy poco susceptible al agua o polvo, que puede afectar a los sensores ópticos y/o mecánicos. Cabe mencionar que en la elección de este elemento se tiene en cuenta su rango de detección así como el tipo de material a sensar y el voltaje de alimentación del sensor [24].

7.1.4. Motor stepper

El motor utilizado es un Nema 17 [25] de 12 V, 0,35 A, resistencia por fase de 35Ω con $1,8^\circ$ de paso y temperatura ambiente de funcionamiento $-20^\circ \text{C} - 50^\circ \text{C}$, regulado con pulsos PWM. El mismo es controlado por un driver A4988 [26] con una salida de hasta 35 V y 2 A, correctamente calibrado acorde a la corriente máxima soportada por el motor. Ambos componentes se pueden apreciar en las figuras 7.4 y 7.5.



Figura 7.4: Nema 17.



Figura 7.5: Driver A4988.

7.1.5. Sistema de recarga

El módulo de transmisión de energía diseñado especialmente para este proyecto (ver figura 7.6) se encuentra ubicado en la estación de monitoreo y es el encargado de transmitir la energía necesaria al dron para recargar la batería. El módulo de transmisión es activado mediante un relé, controlado desde la RPI. El relé utilizado es de 10 A y 30 VDC, suficiente para energizar al sistema de transmisión de energía y se muestra en la figura 7.7.

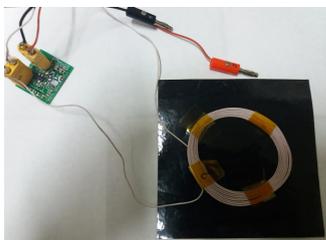


Figura 7.6: Módulo de transmisión de energía.



Figura 7.7: Relé que energiza al módulo de recarga.

7.2. Software

La estación de monitoreo, como ya se mencionó, basa toda su lógica de programación en librerías de Python y en la utilización de threads. A continuación se realiza una descripción de los threads implementados y la lógica detrás de cada uno.

- Thread Dron
- Thread AWS
- Thread Base
- Thread GPS
- Thread OnBoard

Los threads permiten que se ejecuten simultáneamente varias funciones en el mismo espacio de datos, por lo que pueden tener acceso a la misma información o comunicarse entre sí más fácilmente que si estuvieran en procesos separados. Es de esta forma que se logra optimizar considerablemente los tiempos de ejecución, sin necesidad de establecer un flujo de datos avanzado. Por más detalle de la implementación ver Anexo B.2.

7.2.1. Comunicación con el Dron - Thread Dron

Este thread se encarga de manejar la comunicación con el Controlador de vuelo Pixhawk. Utilizando la librería Dronekit de Python, se establece una conexión con el vehículo que se mantiene constantemente activa con el envío y recepción de mensajes de heartbeat. Estos procesos se realizan en segundo plano, y se actualizan en atributos de un objeto creado una vez generada la conexión.

Algunos de los atributos usados en el código son: el tiempo en que se recibió el último heartbeat, el estado de la señal de GPS (cantidad de satélites, gps fix, etc), pitch, roll y yaw, nivel de batería (voltaje, corriente y porcentaje), ubicación tanto absoluta como relativa, etc.

Aparte de los atributos de estado reportados por el dron, existen algunos que pueden ser modificados por el usuario, como ser el estado de armado, modo de vuelo o comandos a ejecutarse.

La figura 7.8 muestra en forma sencilla cómo es el flujo de datos realizado durante la comunicación con el usuario. Se distinguen 4 estados principales del dron:

- Desarmado
- Armado
- Nueva misión
- Lan/Smart RTL

En el caso que el dron esté desarmado revisa 3 puntos importantes: nivel de batería, estado de carga y nueva misión. Si la batería se encuentra por debajo del umbral de voltaje y no está cargándose, se da comienzo al algoritmo de recarga. En cambio, si el nivel de batería está dentro del rango aceptable de carga, se chequea si no existe una nueva misión cargada por el usuario. La misión es cargada por el usuario mediante AWS. Si existe una misión cargada, se realiza un chequeo del sistema, se cambia el modo de vuelo y se ejecuta la misión.

En el caso en que el dron esté armado se reporta el estado general de vuelo.

Existen dos estados más que son agregados por un tema de seguridad, que son el cambio a modo Land o Smart RTL cuando el usuario lo desee. Esto es una acción rápida a tomar si el usuario por alguna razón considera que no es seguro el vuelo que está ejecutando.

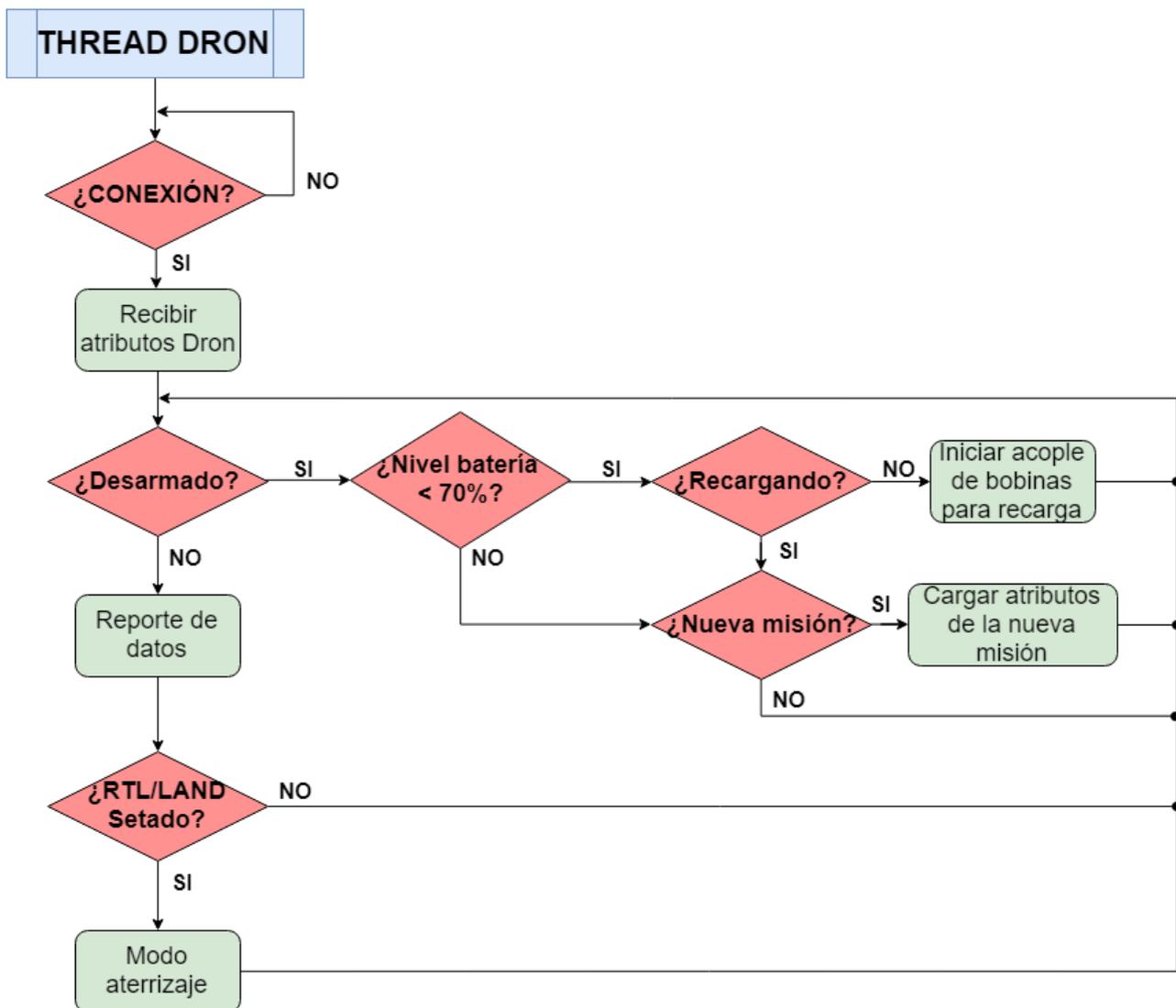


Figura 7.8: Esquema de lógica para comunicación con Dron

7.2.2. Control de la base física - Thread Base

Este thread se encarga de setear y leer los pines I/O de la Raspberry para el control del acople y la recarga.

Para realizar esto se utiliza un Round-Robin con banderas. Estas banderas son modificadas en el Thread Dron, y según el estado se ejecutan las siguientes acciones:

- Acople de bobinas: Se comanda el stepper para realizar el giro en sentido horario del dron, hasta que el sensor inductivo detecta la marca.
- Recarga: Una vez acopladas las bobinas se energiza el módulo de transmisión de energía. Esto se mantiene hasta que el dron reporte un nivel de batería del 100 % o transcurra un tiempo mayor a 6 hs.

7.2.3. Comunicación con el usuario - Thread AWS

La comunicación implementada con el servidor AWS IoT se basa en un comportamiento muy simple. Existen dos conjuntos de variables llamados Reported y Desired, los cuales tal como hace referencia su nombre cumplen funciones de reporte y de seteo.

Las variables Reported cambian su valor asignado sin generar ningún tipo de consecuencia. En cambio, cuando las variables Desired y Reported no coinciden, se reporta a la estación el valor deseado mediante una función específica (callback).

Para implementar este tipo de actualización de variables, el loop del thread tiene dos estados principales (ver figura 7.9). Uno de ellos, se encarga de actualizar a la estación de los cambios de parámetros realizados por el usuario (como ser flags, mails y modos de vuelo). El otro estado principal se encarga de reportar el estado del dron a AWS (como ser batería, misión, GPS, etc.).

Para manejar posibles errores de conexión con el servidor AWS, se implementa un tercer estado.

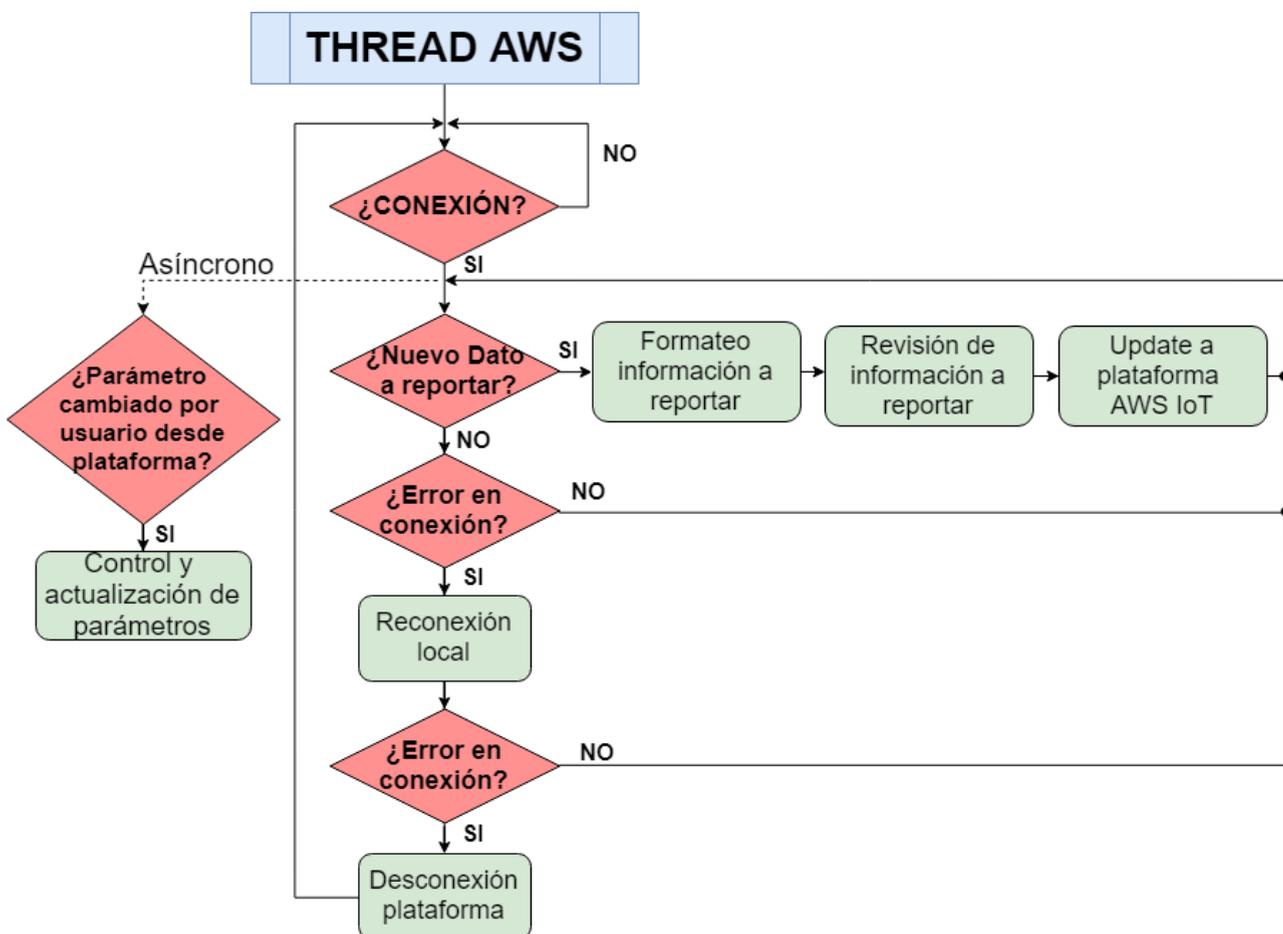


Figura 7.9: Esquema lógico para comunicación con el usuario.

7.2.4. Comunicación con la OnBoard - Thread On Board

La comunicación de la estación con la OnBoard se realiza por medio de un canal destinado únicamente para este propósito. De esta forma, es posible recibir información en tiempo real sin demoras. Para lograr esto, se diseña el thread que se muestra en la figura 7.10.

Las tareas que ejecuta el thread encargado de la comunicación con la OnBoard son:

- Seteo de banderas para la transmisión de información.
- Recepción de estado del dron.
- Recepción de imágenes y su procesamiento.
- Recepción de logs.

Este thread también implementa el envío de correos electrónicos al usuario. Si está habilitado el envío, una vez que se recibe información, la misma se envía.

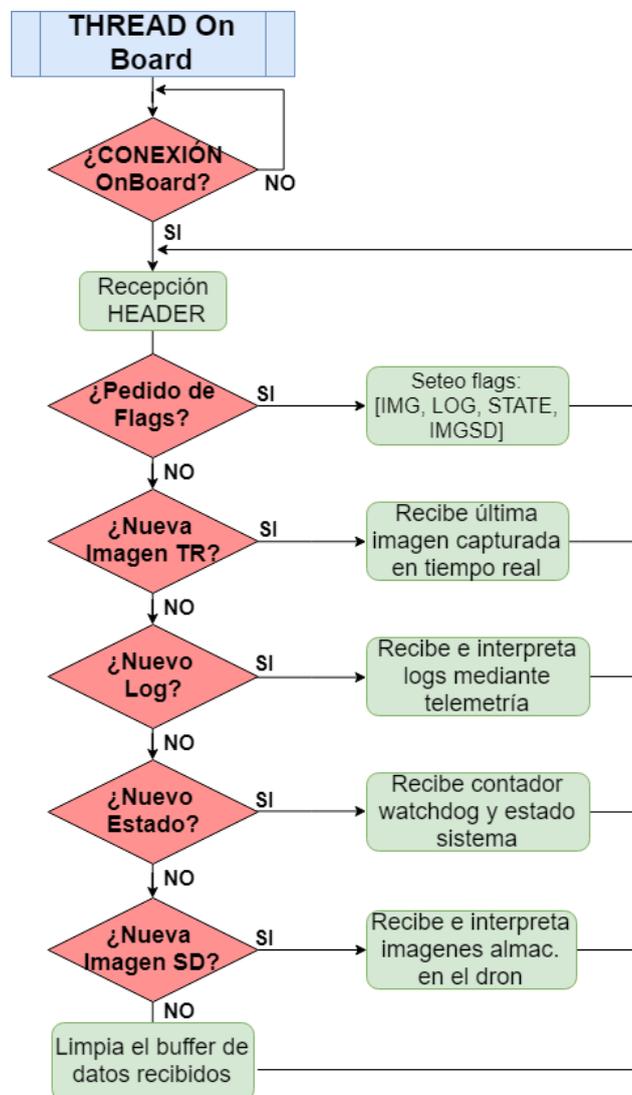


Figura 7.10: Esquema de lógica para comunicación con la OnBoard.

Lo que hace el thread es leer la información que se recibe desde la OnBoard y revisar el encabezado. Dependiendo del mismo es como procesa la información que se recibe a continuación. Se pueden recibir datos de imagen en tiempo de vuelo, logs, estado del sistema o imágenes almacenadas durante el vuelo.

7.2.5. GPS Diferencial - Thread GPS

Un punto crucial a implementar en el sistema es la recepción de los datos de corrección diferencial de GPS, ya que las mejoras en el posicionamiento son sustanciales y claves para el funcionamiento del dron, tanto en su navegación como en la asistencia para el aterrizaje. Para más detalles de corrección diferencial ver el anexo B.3.

Se parte del desarrollo realizado por Termodron 1 en Arduino pero esta vez transfiriéndolo a Python. Para esto se establece la conexión con un cáster (ubicado en la fortaleza del Cerro) y por medio de la estación de monitoreo se envían los datos al dron para ser utilizados en la corrección de su posición.

La implementación del thread impone una mejora en el sistema respecto a lo implementado por Termodron 1, ya que la recepción es continua (en Termodron 1 la recepción se detenía por 30 segundos). El thread implementado se ve en la figura 7.11.

La recepción de datos se realiza por medio de un script adaptado (ver [27]). Este script lee la información que está constantemente emitiendo el cáster en un puerto conocido y la deja disponible en el puerto de loopback, lo que le permite al thread leer la información, y reenviarla en formato MAVLINK al dron.

Ardupilot recomienda fuertemente que el envío de esta información se realice con una frecuencia mayor a 1 Hz, por lo que se debe tener el canal libre para realizar esta transferencia de manera ininterrumpida. Sin embargo, la comunicación mediante Dronekit tiene procesos que corren sin control del usuario, como el heartbeat para notificarse activo, por lo que no se asegura la latencia requerida. Para solucionar este problema se genera con la librería PYMAVLINK (librería en la cual se basa DroneKit) otra conexión con el Controlador de vuelo de manera exclusiva para el envío de los mensajes de corrección.

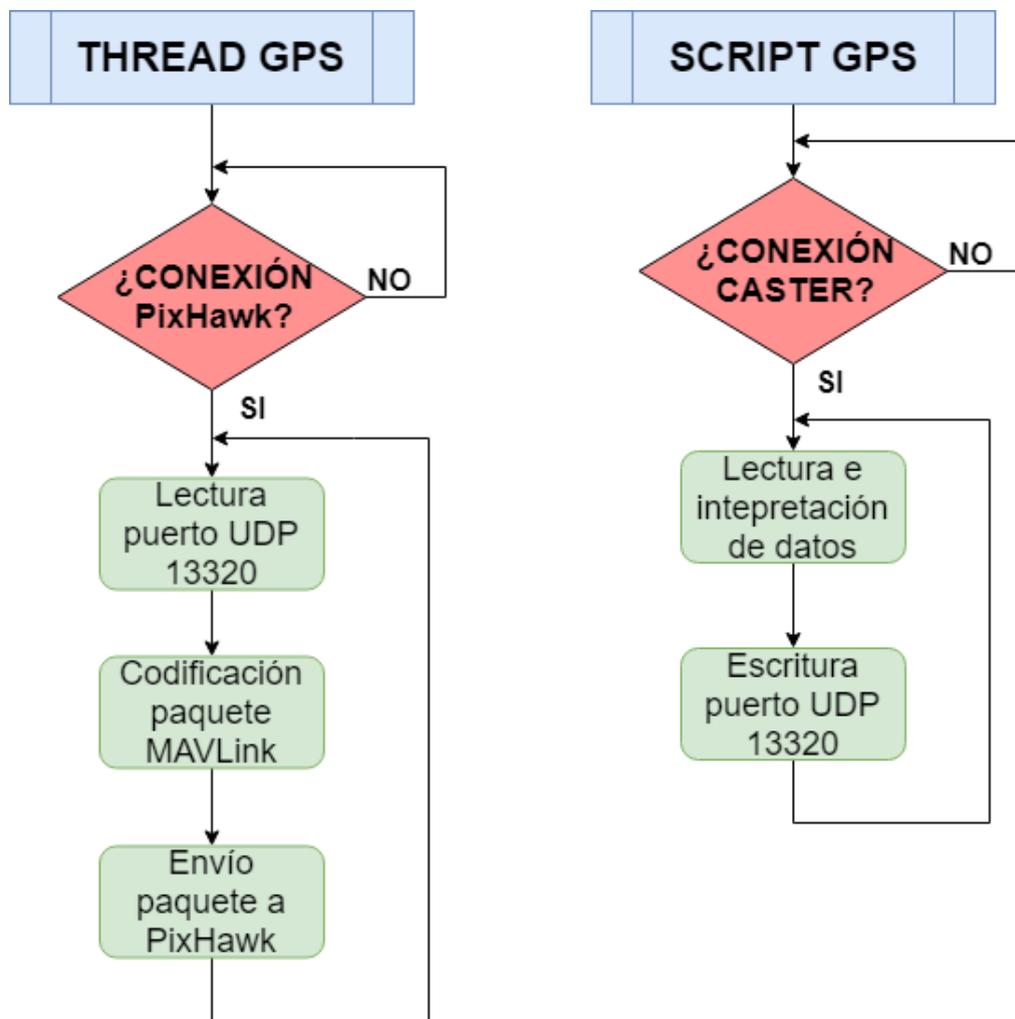


Figura 7.11: Esquema de lógica para envío de información de corrección por GPS diferencial

7.3. Armado final del sistema

Para implementar la estación de monitoreo y control, es necesario generar un sistema donde los componentes interactúen entre sí, y de esa forma se puedan cumplir las funcionalidades del sistema. Se debe tener en cuenta que el lugar físico donde se implemente el susodicho debe cumplir con lo siguiente:

- Oficiar de base para el centro de control y los módulos de recarga.
- Implementar el sistema de acople para la recarga.
- Ser transportable.

Por ende, se diseña un sistema físico que cumple con estas características. A continuación se detalla el proceso de diseño y el resultado final.

Diseño

La función principal a tener en cuenta para el diseño de la estación de monitoreo es la implementación de la recarga. Por tanto, se debe tener en cuenta que la recarga se debe realizar por acople inductivo, y la separación entre las bobinas de transmisión y recepción debe ser no mayor a 0.5 cm. También se debe considerar, que según las necesidades del dron, se pueden colocar más de una antena sobre el mismo.

Además, al igual que los apoyos del dron, se quiere que la estación esté construida de un material no conductor, debido a que de elegir un material conductor, el campo magnético de las bobinas se podría ver afectado o se podrían generar corrientes de Foucault en el sistema. El material debe ser además resistente y liviano.

Teniendo en cuenta lo anterior, es que se piensa en el diseño de una base circular, que mediante un sistema rotatorio con un indicador de posición, permita realizar el acople de las bobinas que se colocan debajo de la base rotatoria en otra placa sin movimiento. De esto se deduce que es conveniente diseñar los apoyos del dron también con forma circular.

Considerando los puntos anteriores, se llega al diseño de la base que se muestra en la figura 7.12.

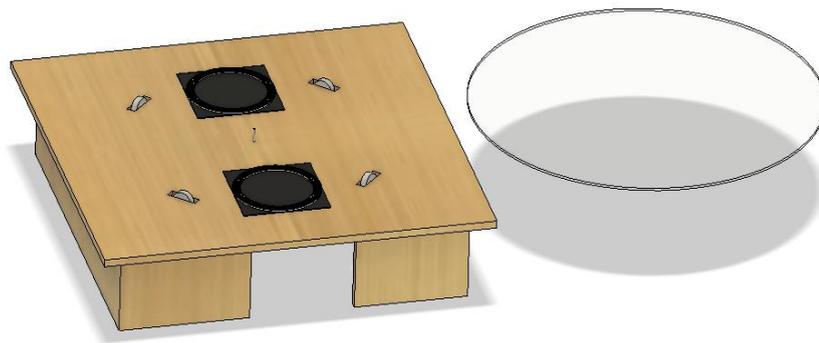


Figura 7.12: Diseño en 3D de la estación de monitoreo junto al sistema de apoyos para el dron. Modelo realizado en Autodesk Fusion 360.

La base está diseñada con forma cúbica. Tiene 2 tapas superiores, la primera, de forma cuadrada, soportando las bobinas y el peso del dron en las ruedas. La segunda, circular y giratoria, con un grosor pequeño que permite la ejecución de la recarga (3 mm aprox), es donde se apoya el dron. Debido a que en su interior debe albergar a la RPI y los módulos de recarga, se le diseña una de sus caras con un sistema de ventilación, y la tapa de arriba deslizable.

En el centro, la base contiene un motor, que mediante un sistema mecánico en el eje, hace rotar a la tapa superior y con ella al dron. Para soportar el peso del dron, se colocan cuatro ruedas en la tapa inferior, la cual ayuda a la rotación de la superior.

Por último, para ayudar al acople de las bobinas, el sistema cuenta con un sensor inductivo que, actuando como fin de carrera, detiene el giro del motor, quedando así las bobinas acopladas. Con este fin, el sensor inductivo detecta una pequeña lámina de metal colocada en la parte inferior del dron.

Implementación

Para implementar la estación, se consideran varios materiales, entre los cuales el plástico surge como mejor opción. Sin embargo, debido al alto costo de manufactura y poca disponibilidad, se decide implementar un primer prototipo de la estación completamente en madera. Cabe destacar que la elección de la base giratoria, diseñada en principio en acrílico, se cambia a madera debido a la poca resistencia del acrílico al peso del dron.

Al diseño final de la estación se le agrega un sistema de ventilación, debido a las altas temperaturas generadas por la recarga. La implementación final de la estación se muestra en la figura 7.13.

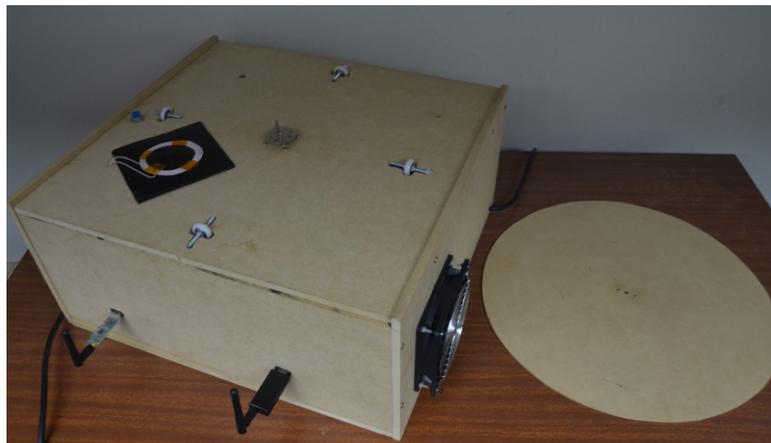


Figura 7.13: Implementación de la estación en madera

A continuación se detallan las pruebas realizadas durante el proyecto para comprobar el funcionamiento de las diferentes funcionalidades que forman parte del sistema implementado.

8.1. Evasión de obstáculos en misión

La prueba de la evasión de obstáculos se divide en dos partes, primero una etapa de simulación y luego la etapa de pruebas en la OnBoard.

8.1.1. Simulación

La etapa de simulación es fundamental, ya que debido al cambio de firmware realizado sobre la Pixhawk, las funciones utilizadas para lograr el control sobre el movimiento del dron son completamente nuevas.

El software que se utiliza para generar el entorno de simulación es propiedad de ArduPilot. El mismo se ejecuta en la propia computadora simulando los valores de los sensores desde un modelo dinámico de vuelo ya creado. Para tener un mejor control de la simulación se ejecuta MAVProxy, que permite ver los datos simulados en un entorno gráfico.

Una vez inicializada la simulación desde Python, se genera una conexión por el puerto UDP 14550, donde se reciben y envían los comandos del dron, de igual manera que cuando se establece la conexión por la antena de telemetría. Como en este caso se simula todo el sistema desde una PC, no se cuenta con los sensores reales que provean los datos de distancia, sino que se utilizan entradas manuales a la misión para verificar el comportamiento ante los comandos de movimiento fino del dron.

De esta forma, la misión es llevada a cabo con variaciones en su recorrido forzadas por los comandos desde el script de Python. Una vista de la implementación de la simulación en el entorno gráfico se puede ver en las figura 8.1.

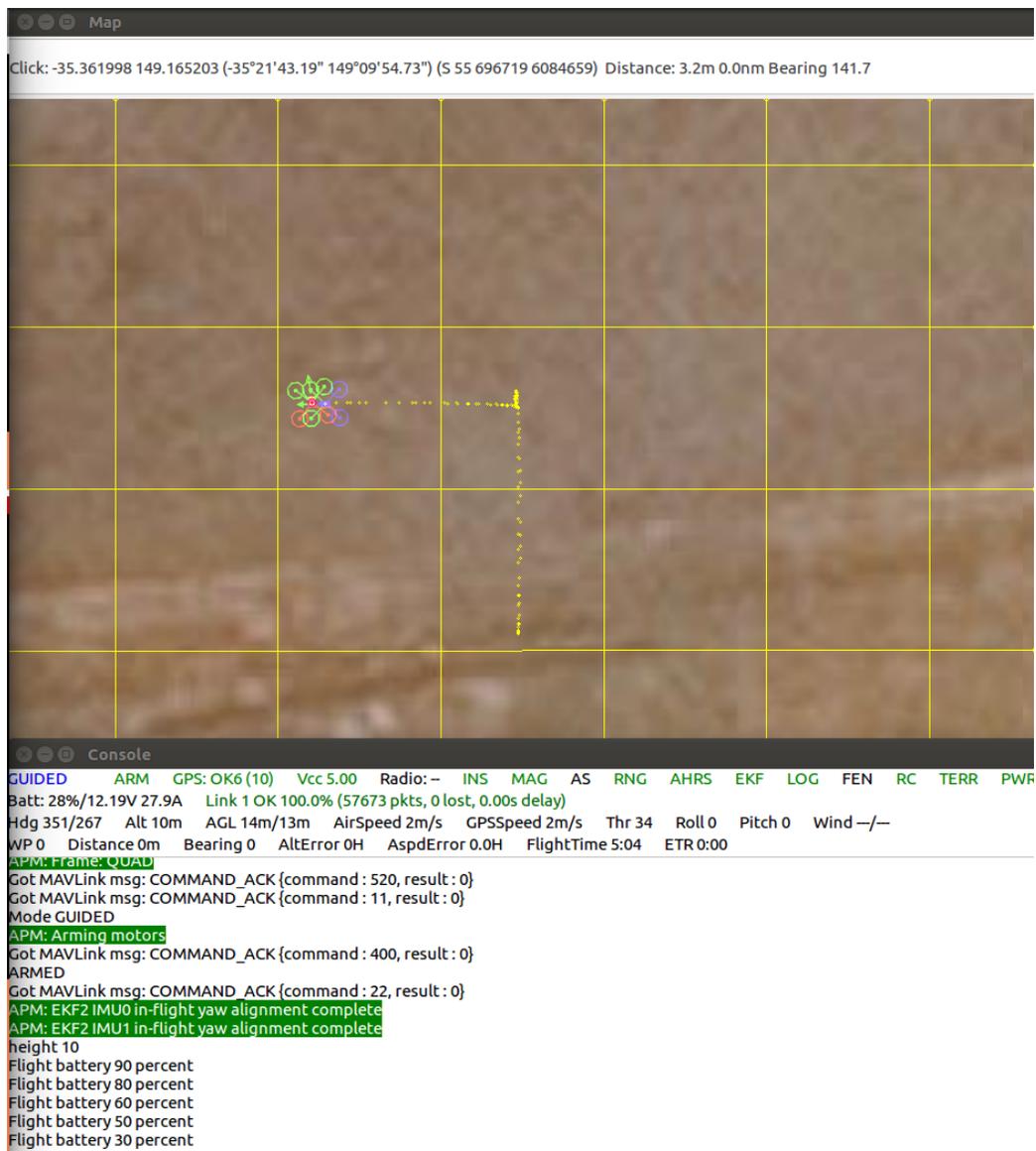


Figura 8.1: Entorno gráfico de simulación MAVProxy.

A partir de lo simulado, se comprueba que los comandos enviados para realizar la evasión son correctamente interpretados por el simulador. Estos comandos serán los utilizados por la OnBoard para enviar las órdenes de movimiento al Controlador de vuelo, según la lectura de los sensores de distancia.

8.1.2. Pruebas en campo

Una vez realizadas las simulaciones, se procede a testear los comandos de movimiento del dron sobre el Controlador de vuelo.

Para realizar las pruebas se comienza en un grado de dificultad bajo, y se va incrementando. Las pruebas requeridas se pueden dividir en dos etapas fundamentales:

1. Movimiento controlado

2. Evasión en misión

Para ambas etapas, los comandos son testeados primero desde Python y luego son trasladados a la OnBoard.

Movimiento controlado

Para la prueba del movimiento desde Python, se envían comandos de movimiento directo al Controlador de vuelo y se evalúa la respuesta del dron, ajustando los parámetros necesarios.

Una vez que se obtiene el movimiento deseado, se realiza la misma prueba pero desde la OnBoard. En este caso, se utiliza el sistema completo, incluyendo la lectura de los sensores para elegir la dirección de movimiento. La prueba comienza ordenando el despegue desde la estación de control, logrando que el sistema quede estable a una altura de 2 m¹. Si el dron no detecta un obstáculo delante, se realiza un movimiento controlado hacia adelante, sensando siempre por la presencia de un obstáculo. En caso de detectar un obstáculo, el dron realiza la evasión según el algoritmo presentado en 6.2.3.

Evasión en misión

Una vez lograda con éxito la prueba de movimiento controlado, se pasa a la evasión en misión. Esta prueba consiste en ejecutar una misión y que el dron sea capaz de evadir un objeto y continuar la misión programada. Para esto, se ejecuta un tramo de la misión a una altura baja (3 m) y el resto de la misión en una altura de 8 m .

En la figura 8.2 se muestra l misión planificada (blanco) y el recorrido realizado por el dron durante la misión (amarillo) ² así como los tramos en los que se realiza la evasión. Adicionalmente, en la figura 8.3 se muestra la altitud del dron durante la misión.

¹Se setea esta altura para poder colocar objetos delante del dron de forma manual.

²Obtenido del log del Controlador de vuelo

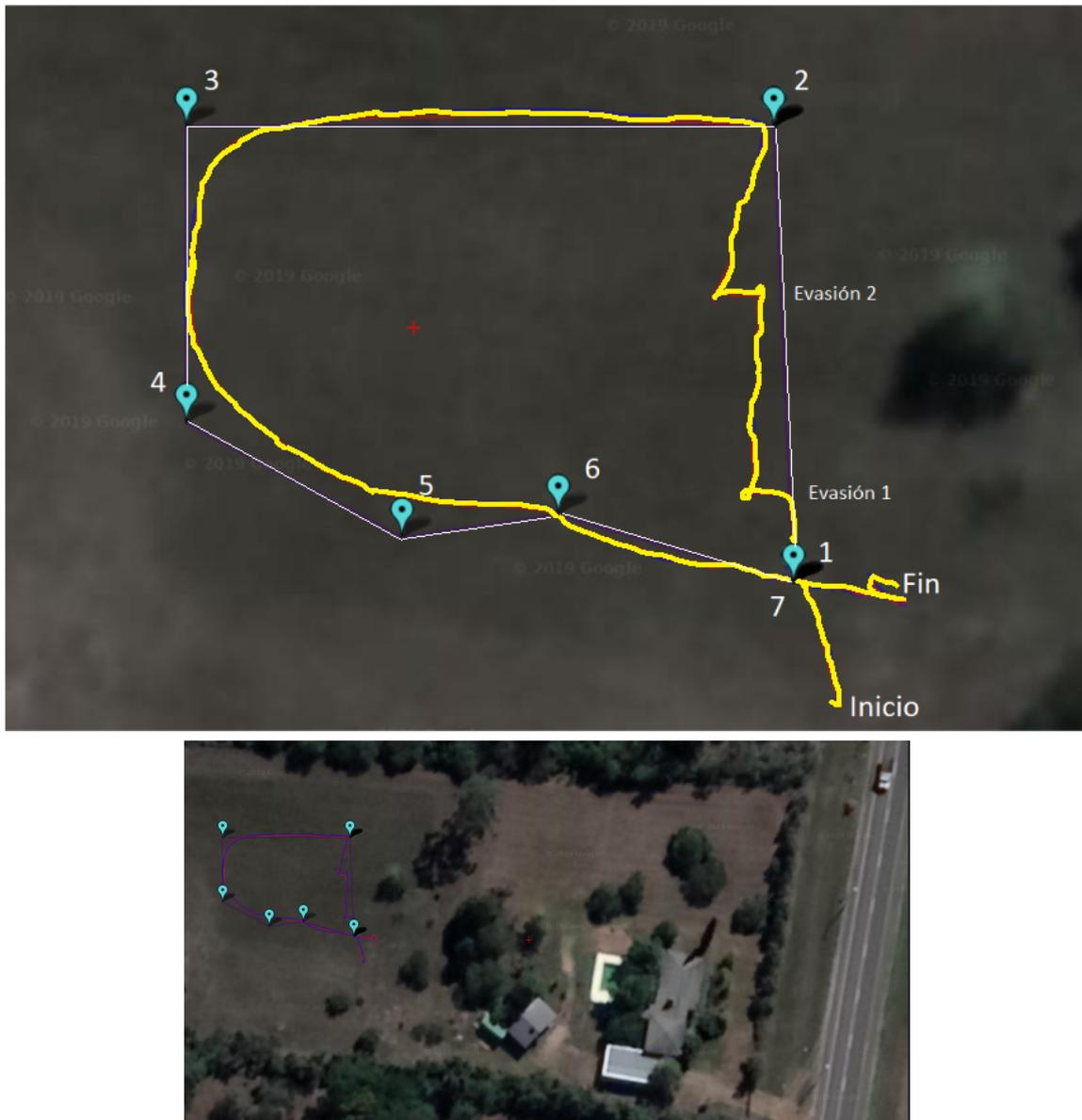


Figura 8.2: Puntos de misión y recorrido de prueba completa

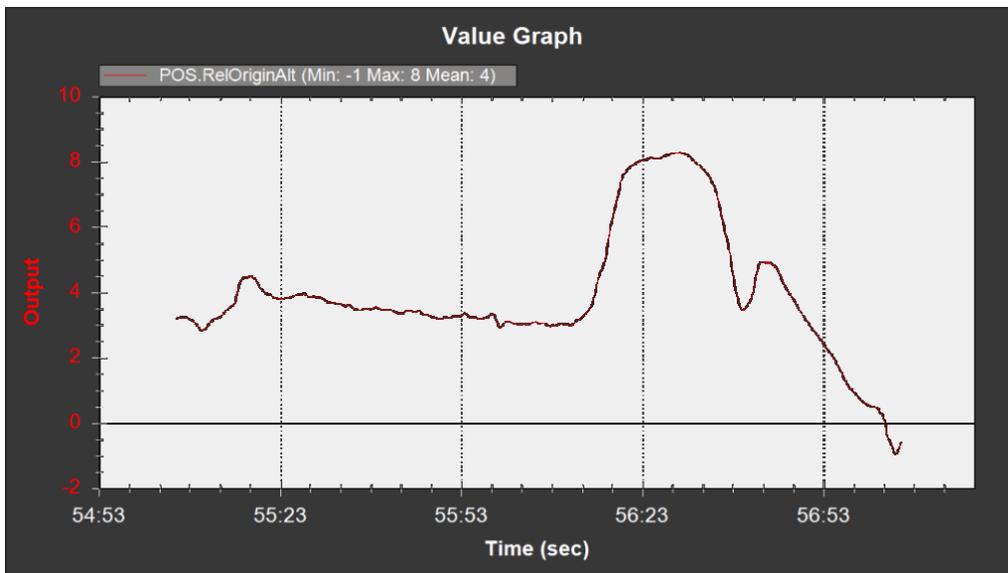


Figura 8.3: Valores de altura durante misión

Como se observa en el primer tramo de misión, existen dos evasiones a obstáculos ejecutadas por la OnBoard. En estas evasiones se coloca un objeto delante del dron, por lo que el movimiento realizado por el dron es a la izquierda hasta no detectar más el objeto y continuar con la misión indicada. El objeto usado para las pruebas se puede ver en la figura 8.4.



Figura 8.4: Imagen tomada durante la prueba de evasión en misión

A partir de los resultados de las pruebas en misión se concluye que el dron es capaz de evadir obstáculos, retomando correctamente la misión una vez que son evadidos.

8.2. Sistema de recarga final

La prueba del sistema de recarga final consiste en lograr recargar las batería del dron, con el mismo ubicado sobre la estación de control. La ejecución de esta prueba consiste en tres pasos principales:

1. Acople de las bobinas, lo que incluye el giro del motor y el funcionamiento del sensor inductivo.
2. Comienzo de carga, lo que incluye lectura del nivel de batería y el encender el relé.
3. Detención de la carga. Incluye la lectura del voltaje de batería y corte del relé.

Mediante la realización de las tres etapas se comprueba que el sistema es funcional, logrando acoplar las bobinas, comenzar la recarga de la batería del dron y finalizarla en un tiempo aproximado de 4 hs.

8.3. Sistema de comunicación

En esta sección se realiza el testeo del sistema de comunicación entero del dron, incluyendo la comunicación Dron-Estación de Monitoreo y Estación de Monitoreo - Usuario.

8.3.1. Comunicación Dron-Estación de Monitoreo

La comunicación del dron con la estación de monitoreo se realiza por dos canales simultáneos. Un canal está conformado por las antenas que comunican el Controlador de vuelo con la estación y el otro es el que comunica la OnBoard con la estación.

Ruido y potencia entre antenas

Para poder implementar un sistema de comunicación con dos antenas de telemetría sobre el dron, se considera necesario testear el ruido y la posible interferencia entre ambas.

Las antenas se configuran utilizando la herramienta de Mission Planner [28], de forma que se utilicen diferentes canales y corrección de errores para la recepción de información. De esta forma, se evitan recibir datos corruptos o ruido.

La evaluación de la potencia y ruido de ambas antenas colocadas juntas se realiza utilizando el software de 3DR Radio Sik. Para la evaluación, se conectan ambas antenas a la PC. Una de ellas, recibe datos desde la OnBoard (fotos, logs y estado) mientras la otra recibe datos del Controlador de vuelo. La herramienta de Radio Sik permite conectarse a una de las antenas por vez, y evalúa el ruido y la potencia (RSSI) de las señales en la antena local (ubicada en la PC) y en la remota (sobre el dron)³. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 8.5 y 8.6.

³Esta prueba fue realizada con el dron prendido pero desarmado en tierra.

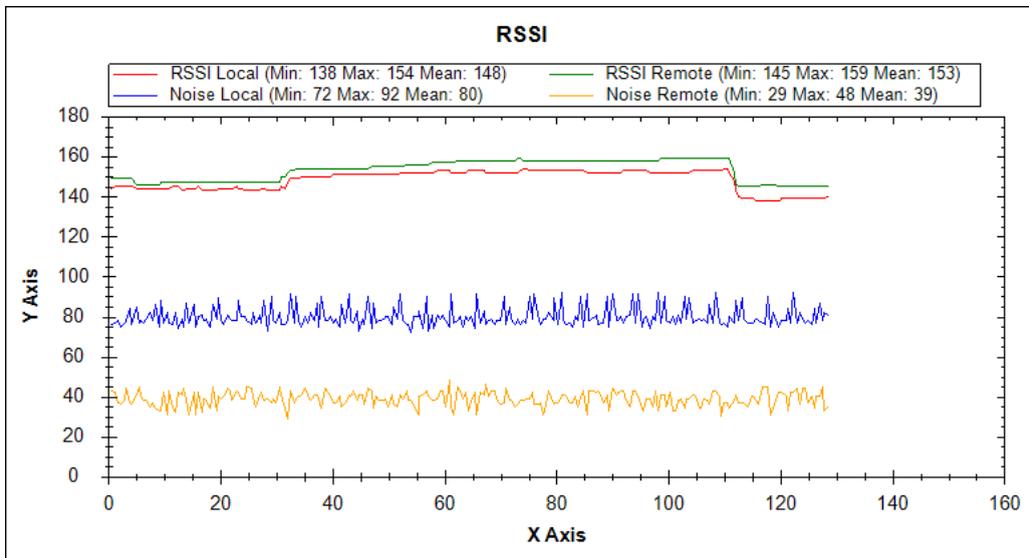


Figura 8.5: Resultados para la evaluación del canal OnBoard-PC.

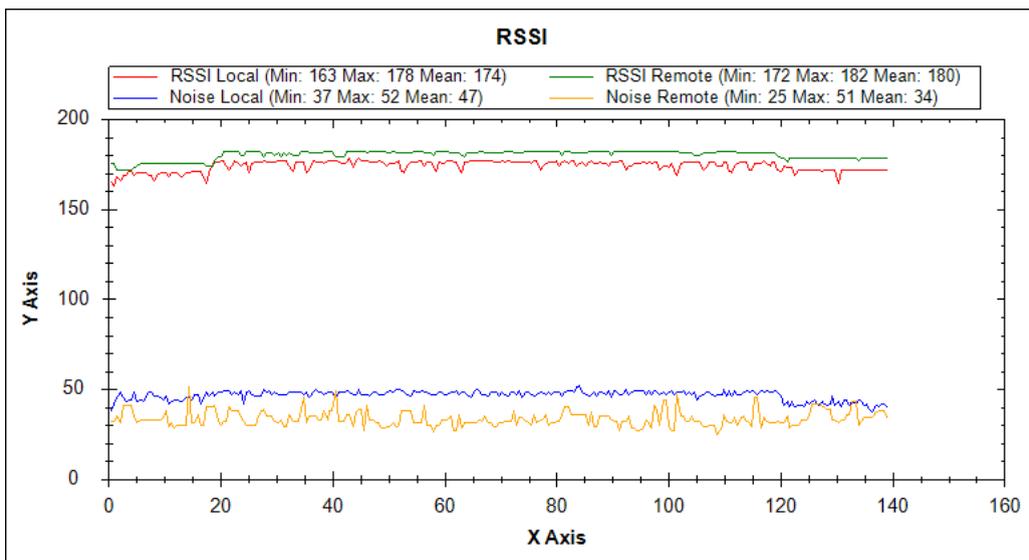


Figura 8.6: Resultados para la evaluación el canal Controlador de vuelo - PC.

A partir de estos resultados se observa que ambas antenas son capaces de transmitir información con la máxima potencia sin generarse interferencia o pérdida de información.

Recepción de log y fotos en la estación

El dron es capaz de almacenar las fotos tomadas por la cámara térmica así como los estados y eventos relevantes ocurridos durante el vuelo. Esta información es enviada a la estación de monitoreo una vez que el dron aterriza.

Para testear la correcta recepción de la información, se modifica el código de la OnBoard para que la misma saque fotos y guarde estados del log sin estar volando. Una vez obtenidos estos

datos, se inicia la comunicación con la estación, la cual setea las flags necesarias de comunicación y pide la información.

A partir de esta prueba se obtuvo que el canal de comunicación es ruidoso, obteniendo una tasa de errores del 40 % aproximadamente. Esto lleva a la necesidad de robustecer el canal de comunicación para no perder información. Debido a la restricción de tiempos y a que esta modificación no se encontraba en el alcance del proyecto, se deja esta mejora como recomendación para futuras actualizaciones del código del dron.

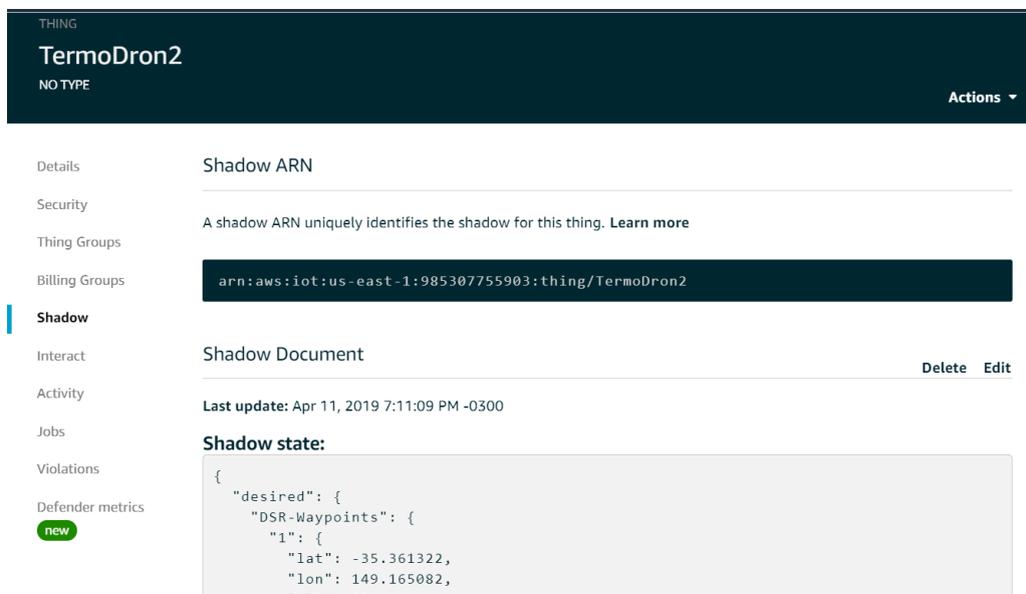
8.3.2. Comunicación Estación de Monitoreo - Usuario

El usuario dispone de dos vías de comunicación con la estación de control. Una en tiempo real mediante AWS y la otra mediante la recepción de mails. A continuación, se muestran los resultados del análisis de ambas funcionalidades.

AWS

Para el envío de la información de vuelo en tiempo real al usuario se utiliza el servicio web AWS.

Para realizar la prueba de este servicio, se enciende el dron y la estación. Se confirma que el estado del dron es correctamente recibido por el servicio web, actualizando cada 1 s lo reportado. En la figura 8.7 se muestra la visualización del servidor web con los reportes obtenidos del dron.



The screenshot shows the AWS IoT console interface for a device named 'TermoDron2'. The left sidebar contains a navigation menu with options: Details, Security, Thing Groups, Billing Groups, Shadow (highlighted), Interact, Activity, Jobs, Violations, and Defender metrics (with a 'new' badge). The main content area displays the 'Shadow ARN' as 'arn:aws:iot:us-east-1:985307755903:thing/TermoDron2'. Below this, the 'Shadow Document' is shown with a 'Last update' of 'Apr 11, 2019 7:11:09 PM -0300'. The 'Shadow state' is displayed as a JSON object:

```
{
  "desired": {
    "DSR-Waypoints": {
      "1": {
        "lat": -35.361322,
        "lon": 149.165082,
        "alt": 0
      }
    }
  }
}
```

Figura 8.7: Visualización del servidor web AWS.

Mails

La estación de monitoreo y control, entre otras funciones, está encargada de enviar los logs de vuelo y las imágenes tomadas por la cámara al usuario, cuando este lo solicite.

Para realizar esta prueba, una vez recibidas en la estación las fotos y logs adquiridos por el dron y mediante el uso de AWS, se comanda a la estación para que envíe los datos por mail. Se verifica que todos los logs y las fotos guardados en la estación se reciben correctamente por mail (como adjuntos). El formato del mail y el resultado obtenido se pueden observar en la figura 8.8.



Figura 8.8: Mail recibido durante la prueba

8.4. Corrección diferencial de posición

Debido al cambio realizado en el firmware del Pixhawk así como en el código e implementación de la estación de monitoreo, es que se considera necesario comprobar la correcta recepción y procesamiento de la corrección de GPS mediante RTK. Esta corrección es enviada por la estación y recibida y procesada en el dron.

Para realizar esta prueba, se obtienen los datos de geolocalización del dron en ciertos puntos conocidos y se comparan con las medidas de esos puntos⁴, tanto para el caso del dron recibiendo la corrección y sin recibirla. De esta forma, a partir de los resultados se puede verificar si el dron está recibiendo e interpretando los datos de corrección diferencial correctamente.

La prueba se realiza en dos puntos diferentes (ver figura 8.1). Vale aclarar que el punto 1, cuenta con la menor cantidad de satélites disponibles (6) debido a su ubicación, mientras que el punto 2 cuenta con 14.

⁴Medidas realizadas por el Instituto de Agrimensura, las cuales tienen una desviación de 12 cm en latitud y longitud.

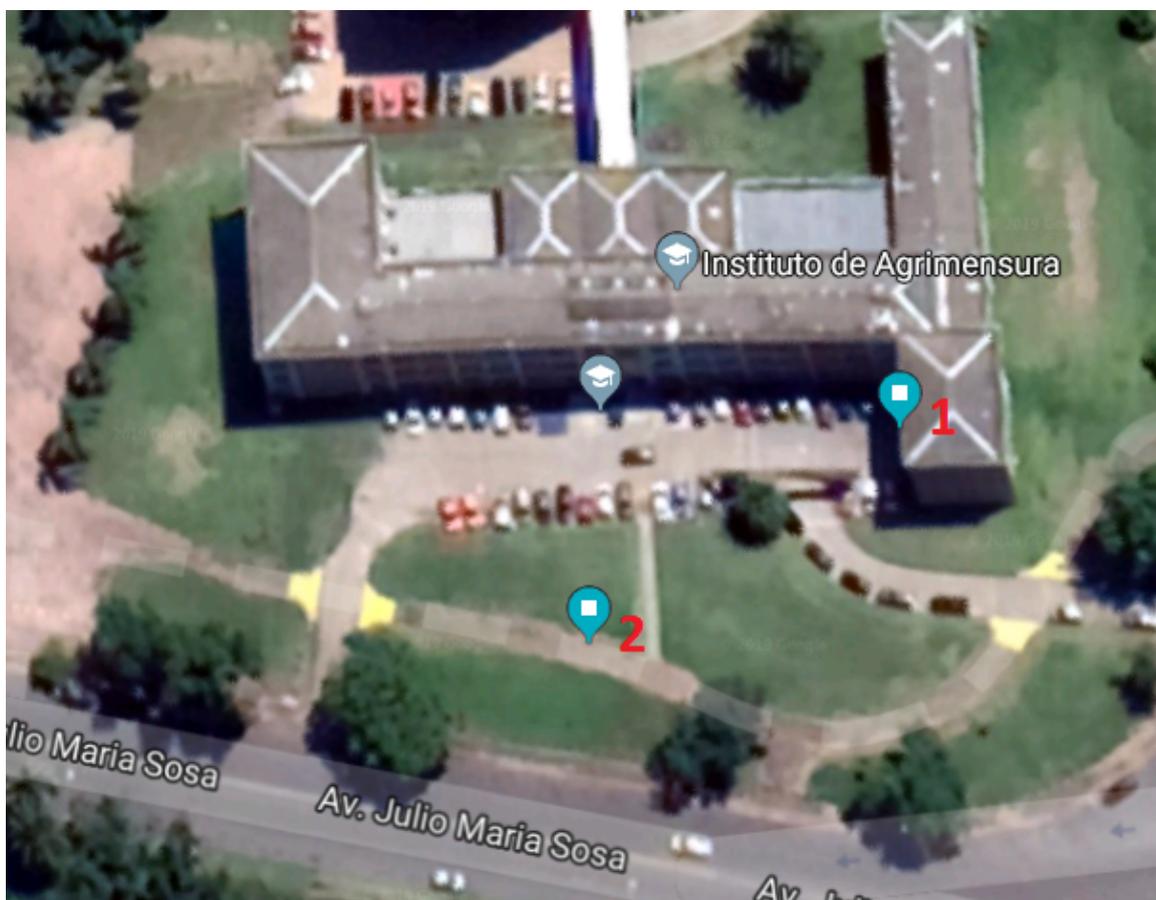


Figura 8.9: Ubicación en el mapa de los puntos utilizados en la prueba.

Los resultados obtenidos durante las pruebas se muestran en la Tabla 8.1. El análisis de los datos se realiza utilizando el análisis de coordenadas y posición de [2].

	Punto 1		Punto 2	
	Latitud (°)	Longitud (°)	Latitud (°)	Longitud (°)
Coord. medida por Agrimensura	-34.9192619	-56.1661826	-34.9194817	-56.1665645
Promedio de coord. (sin corrección)	-34.9191332	-56.1660637	-34.9194509	-56.1666097
Promedio de coord. (con corrección)	-34.9192832	-56.1662005	-34.9194685	-56.1665822
Diferencia sin corrección (cm)	1774		632	
Diferencia con corrección (cm)	224		200	

Tabla 8.1: Resultados de las medidas realizadas en los puntos de interés.

A partir de los resultados obtenidos se observa que efectivamente, el error cometido al hallar los puntos de coordenadas es menor cuando se implementa la corrección diferencial. Además,

observando los resultados se puede ver que los puntos con mayor recepción satelital poseen un error menor. Con estos resultados, se comprueba que el dron es capaz de interpretar los datos de corrección diferencial y corregir su posición, logrando una precisión estática de 2 m.

Finalmente, en las figuras 8.10 y 8.11 se puede observar la dispersión de los puntos para los datos obtenidos con y sin corrección. A partir de esto se ve la clara diferencia existente, donde se observa que los datos con corrección diferencial poseen una dispersión notoriamente menor respecto a los datos sin corrección.

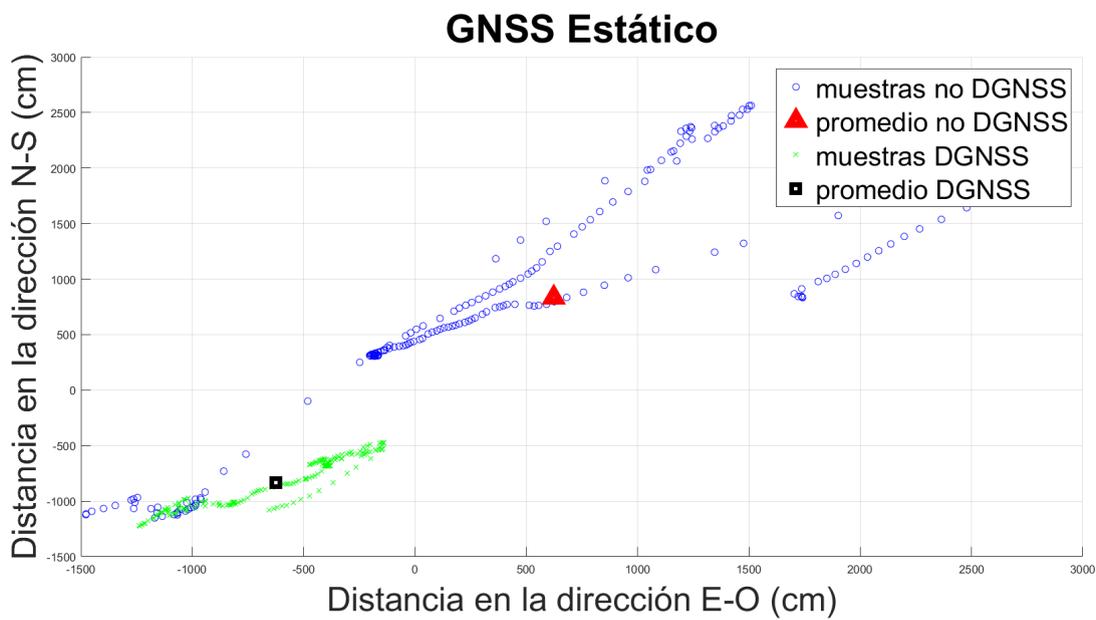


Figura 8.10: Resultado de la prueba para el punto 1.

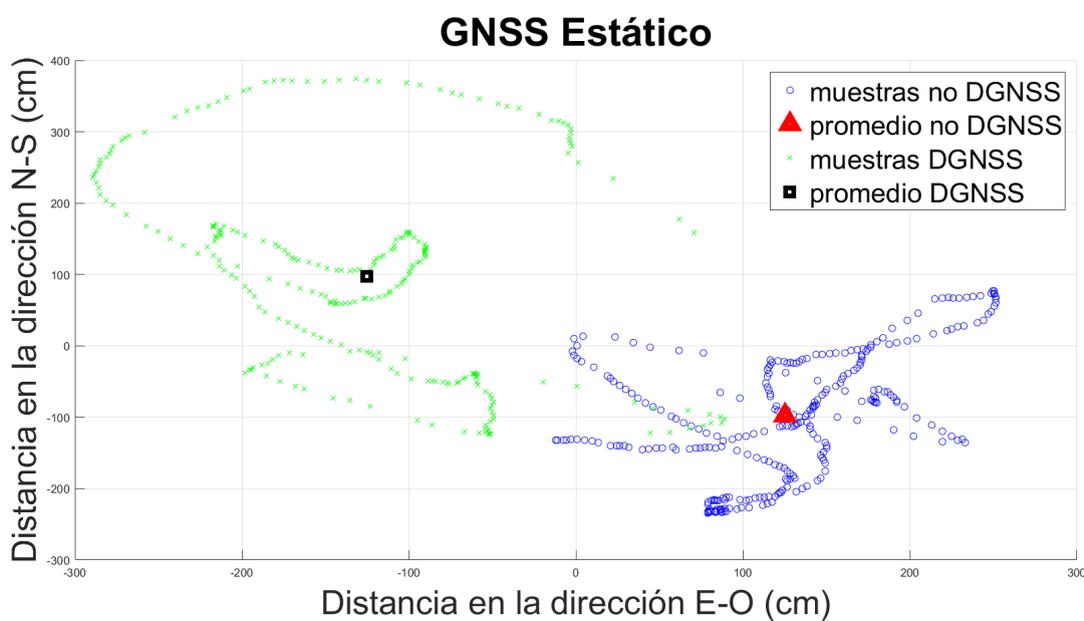


Figura 8.11: Resultado de la prueba para el punto 2.

8.5. Baliza de asistencia al aterrizaje

Una de las mejoras identificadas para el dron es la implementación de un sistema para el aterrizaje preciso del mismo sobre la estación de control. Para realizar esto, se busca aprovechar las capacidades existentes del dron y así facilitar su operación. En este caso se decide utilizar la cámara infrarroja, la cual, en conjunto con una baliza en la estación, proporcione información al dron acerca de su posición relativa a la estación.

Elección de la baliza

Cabe destacar que existen varias limitaciones en el diseño de la baliza. La primera es el rango de longitudes de onda donde debe emitir (8 a 14 μm^5), seguido por una limitación atribuida al tipo de recarga elegido⁶ que resulta determinante para el material utilizado, ya que el mismo no puede ser conductor. La siguiente es el tamaño, que no puede ser más grande que la estación y por último el consumo de energía, el cual se desea que sea el menor posible.

Las pocas balizas comerciales encontradas en el mercado son de aplicación militar [29] y demasiado caras para el presupuesto [30]. Debido a esto, se decide estudiar los materiales disponibles para la realización de una baliza casera.

Una vez estudiado qué tipo de materiales se encuentran disponibles para la construcción de la baliza, las mismas se arman y se llevan a cabo pruebas para determinar la plausibilidad de ser detectadas por la cámara. El detalle de las pruebas y los resultados obtenidos se muestran en el Anexo B.

De los resultados de esta experiencia se concluye lo siguiente:

- La detección de la baliza depende fuertemente de la emisividad del material utilizado y la distancia a la baliza (cuanto más cercano a 1, mejor).
- Los materiales disponibles no son adecuados para realizar la baliza.
- Se recomienda la habilitación de la radiometría para fijar la escala utilizada por la cámara, independizándola de su temperatura interna.

Debido a estos resultados es que se decide no seguir adelante con la implementación del aterrizaje preciso, ya que se considera que las balizas disponibles no son adecuadas para esta función. A pesar de esto, se diseña un algoritmo como prueba de concepto.

Este algoritmo, en conjunto con otro sistema de adquisición de imágenes o baliza y unos pequeños ajustes, puede ser capaz de calcular la posición de la estación de control y ejecutar el aterrizaje. El detalle de la implementación del algoritmo se encuentra en la sección 6.2.3.

⁵Rango de detección de la cámara Flir Lepton utilizada.

⁶Las antenas se colocan en la base, cercanas a donde iría colocada la baliza. Cualquier componente metálico cercano a las mismas podría verse afectado por el campo magnético generado en la recarga, y viceversa.

Creación del BMP

A partir de las pruebas anteriores, se observa un efecto adicional producido por el algoritmo de transformación a BMP de los datos obtenidos por la cámara. Este efecto hace que para datos similares obtenidos por la cámara, se observen grandes diferencias en las representaciones BMP. Un estudio más profundo de este efecto se puede ver en el Anexo B.

Investigando el algoritmo de transformación se observa que el problema parece encontrarse en el rango dinámico utilizado para crear la escala de colores en el BMP. Dicho algoritmo considera el promedio de temperaturas en cada imagen y lo utiliza para distribuir la representación, por lo que dicha escala varía entre imágenes, no siendo posible comparar imágenes distintas, sino temperaturas relativas dentro de una misma captura. Por ende, esta representación debería ser un punto a corregir en el futuro.

CAPÍTULO 9

PUNTOS A SEGUIR DESARROLLANDO

Durante el transcurso del proyecto, se identificaron algunas mejoras a implementar y nuevas funcionalidades para agregar al sistema, que por distintas razones, no se pudieron implementar. A continuación se realiza un resumen de las mismas.

9.1. Agregado de otra cámara

Debido a los resultados obtenidos durante las pruebas de la cámara para la detección de una baliza, es que se recomienda la adición de otro tipo de cámara que asista en el aterrizaje, ya sea para utilizarla con reconocimiento de patrones (por ejemplo patrones en el piso [31] [32]), con otro tipo de baliza (como luces RGB [33]) u otro tipo de asistencia [34]. También se puede pensar en agregar la función de video en tiempo real.

Adicionalmente, como se menciona en la sección B.4, se recomienda el cambio de la cámara térmica por un modelo posterior con radiometría, ya que este permite al usuario compensar los efectos estudiados ingresando parámetros como la emisividad, la temperatura ambiente y la temperatura de fondo, logrando obtener lecturas más precisas y adecuadas para el objetivo de este proyecto.

Un ejemplo es el presentado en [35], que además de poseer parámetros de radiometría, posee salida con formato RGB. Con este cambio se pueden utilizar ejemplos como los de [36] donde se emplean algoritmos de reconocimiento de patrones para identificar la zona de aterrizaje. También se puede continuar utilizando RAW e implementar el algoritmo de transformación en la base con funciones como las de [37].

9.2. Rediseño físico de la estación de control

El rediseño de la estación de control es recomendado, ya que puede permitir la inclusión de un sistema para ayudar mecánicamente en el aterrizaje preciso del dron. Para esto, se propone una

estación con forma de cono trunco invertido, como se muestra en la figura 9.1. De esta forma, las paredes de la estación pueden ayudar al aterrizaje del dron y al acople con las bobinas.

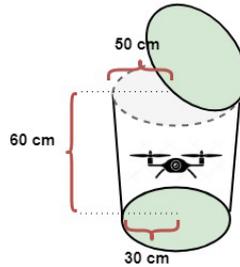


Figura 9.1: Diseño sugerido para la estación de control y recarga.

9.3. Optimización de componentes y peso

Debido a la constante actualización de las tecnologías disponibles en el mercado, se recomienda el recambio de componentes. Más precisamente, se recomienda actualizar los componentes relacionados al dron, como ser:

- Cambio de motores por unos con más empuje.
- Cambio de batería por una con mayor capacidad.
- Cambio del frame por uno más liviano.

Además, si se dispone de los recursos necesarios, se recomienda la actualización del Controlador de vuelo a la última versión (Pixhawk 4) y la compra de un nuevo GPS con capacidad DGNSS.

9.4. Mejora en comunicación Dron-Estación

Se deben mejorar dos factores de la comunicación, el primero es la corrección de errores en los datos enviados desde la OnBoard. Esto se puede lograr realizando un algoritmo de comunicación más robusto.

La segunda mejora es en la distancia de comunicación. Actualmente, el alcance de la comunicación entre la estación de monitoreo y el dron es de 500 m (según lo comprobado por Termodron 1). Debido a esto, es que se proponen tres opciones para mejorar el alcance:

- Realizar una Estación de Control móvil.
- Agregar amplificadores bidireccionales a las antenas de telemetría.
- Cambio en tecnología de antenas (RFD900 MHz).

9.5. Mejora en sensores de distancia

Los sensores de ultrasonido utilizados tienen un alcance máximo de 2 m. Aunque es suficiente para implementar la evasión de obstáculos, esto limita la velocidad del dron. Se recomienda entonces la utilización de sensores de distancia con un rango lo mayor posible.

9.6. Mejora del sistema de recarga

El sistema de recarga implementado está diseñado de forma tal, que la batería del dron es utilizada al mismo tiempo en que es recargada. Debido a esto, el tiempo de recarga es mayor, y se corren riesgos de dañar a la batería. Por esta razón, se propone la implementación de un circuito que permita energizar al sistema y en paralelo recargar la batería. El circuito propuesto se muestra en la figura 9.2.

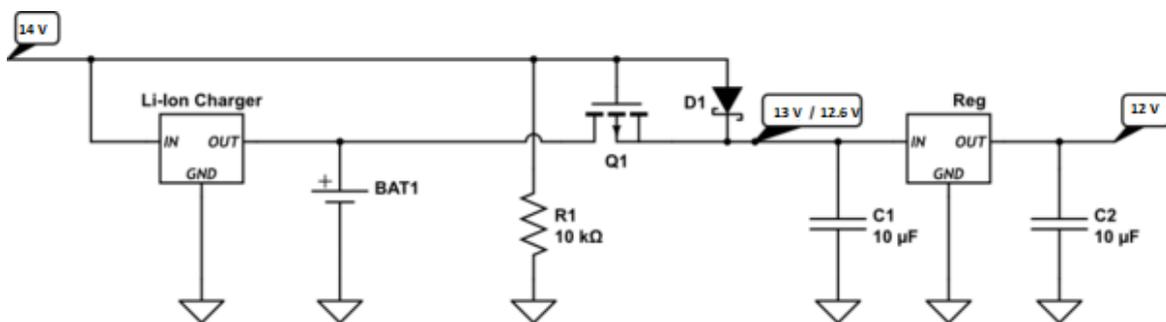


Figura 9.2: Circuito propuesto para la la recarga sobre el dron.

9.7. Paneles solares en la base

Debido a que la estación de monitoreo es la encargada tanto de recibir la misión como de realizar la recarga del dron, debe estar activa en todo momento. Por esto, se considera necesaria la implementación de un sistema capaz de proveer la energía suficiente. Se cree que los paneles solares son una buena opción, ya que permiten la generación de energía renovable durante el día en una manera ecológica, se encuentra disponible en todo el mundo, es gratis y silenciosa, y posee bajo mantenimiento. Se puede almacenar dicha energía en baterías para suministrarla en un proceso de carga cuando sea necesario.¹

9.8. Recorrido de un área

Esta funcionalidad permite al usuario ingresar los vértices geográficos del área a recorrer, y el sistema calcula el mejor recorrido para la zona delimitada por ellos.

Es una función que se encontraba disponible en el proyecto Termodron 1 pero que debido al reemplazo de la GCS por un sistema totalmente nuevo, debe ser programada nuevamente utilizando Python.

¹Un ejemplo de este tipo de sistema se puede observar en [3].

El sistema final desarrollado en este proyecto logra cumplir los objetivos planteados, desarrollando un sistema más autónomo que continúa la línea de trabajo de Termodron 1.

En este proyecto, se logra establecer una comunicación en tiempo real del sistema con el usuario, así como una autonomía de funcionamiento potencial de meses, debido a la implementación de la recarga autónoma. Además, se desarrolla la mejora del control de vuelo, lo que permite el diseño de un nuevo algoritmo de evasión de obstáculos sin dependencia del GPS. Por último, y no menor, se implementa una estación de monitoreo y control basada en Python para mejorar los tiempos de respuesta del sistema y la comunicación con el usuario.

En el dron se mejora el control de vuelo mediante el cambio de firmware del Pixhawk. También se mejora el empuje y el control de la cámara con la actualización de componentes. Por otro lado, se agrega un nuevo canal de comunicación para el envío de fotos y estados a la estación de monitoreo y control. Cabe mencionar que dentro de las mejoras propuestas no se logra la implementación de un aterrizaje preciso con la cámara disponible, y se deja como recomendación la utilización de otra cámara para este fin.

Con respecto a la estación de monitoreo y control, se realiza un cambio en la tecnología utilizada (de Arduino DUE a Raspberry Pi 3). Este cambio permite obtener mejoras en la comunicación entre el usuario y el dron, resultando en la disminución de tiempos de respuesta del sistema. Además, se genera una plataforma para el desarrollo de nuevas funcionalidades. Por último, se desarrolla un prototipo de base física que contiene todos los elementos de la estación de control y realiza el acople del sistema de recarga. Cabe aclarar que la base desarrollada es una prueba de concepto del diseño a implementar, no siendo lo suficientemente robusta para soportar las condiciones de uso esperadas.

Mediante el diseño e implementación de la recarga por acople inductivo, se logra una mejora sustancial en la autonomía del sistema total. Se logra la recepción en el dron, de 26 W con una eficiencia del 57%, lo que es un logro importante si se compara con otros sistemas de transmisión de energía disponibles en el mercado. Para mejorar este diseño, se recomienda la implementación de un circuito adicional de distribución de energía sobre el dron.

Como conclusión general del proyecto, se logra la realización de muchos de los objetivos propuestos, así como la identificación de mejoras a realizar para continuar con esta línea de investigación y desarrollo. Además, se cree que los conocimientos adquiridos en base al trabajo en grupo, planificación y gestión de este proyecto resultan esenciales para el futuro profesional y personal de cada uno de los integrantes de este equipo.

El sistema diseñado e implementado por el grupo Termodron 1, que se muestra en la figura A.1, está formado por una base de control (Ground Control Station o GCS) y el dron. Dicha base se encarga de implementar la comunicación entre el dron y el usuario, para permitir un manejo remoto del UAV. El dron es el encargado de cumplir las misiones y tomar las fotos termográficas.



Figura A.1: Sistema implementado por Termodron 1.

A.1. Descripción funcional

La idea del sistema dron-GCS es poder proveer al usuario un modo de controlar al dron de forma remota y enviar misiones a través de información enviada a la GCS por mail. De esa forma, la GCS es la encargada de recibir las coordenadas enviadas por el usuario, las cuales definen el área a recorrer por el dron, para, luego de analizarlas, enviárselas a éste.

Una vez iniciada la misión, el usuario es capaz de indicar al dron que detenga la misión o que envíe información. A la vez, el dron envía a la GCS, de forma periódica información del estado actual de la misión.

Para tener una mejor precisión en la posición del dron en el espacio, se usa el método de GPS diferencial (DGNSS).

Las funciones principales del sistema implementado por Termodron 1 son las siguientes:

Dron

- Ejecutar la misión según lo requerido por la GCS.
- Enviar a la GCS la información que esta solicite (e.g. posición, velocidad, estado de la batería).
- Ejecutar comandos puntuales solicitados por la GCS (e.g. cancelar la misión, enviar una foto, cargar una nueva misión, ir a determinado punto)
- Guardar una bitácora de vuelo con las variables de interés (latitud, longitud, altura, tiempo, carga de batería, imagen térmica, velocidades, consumo de los motores).
- Estimar su estado en tiempo real y transmitirlo a la GCS.

GCS

- Recibir y procesar los correos electrónicos enviados por el usuario
- Enviar correos electrónicos al usuario con la información que este requiera.
- Calcular los waypoints¹ de la misión a partir de los vértices que definen el área a relevar enviados por el usuario y evaluar la viabilidad de la misión.
- Recibir del usuario y retransmitir al dron los parámetros de misión.
- Recibir desde el servidor de corrección de posición y retransmitir al dron las correcciones de GNSS en tiempo real.
- Recibir la información de estado del dron relevada por el mismo.

Finalmente, cabe aclarar que la estabilidad y manejo de motores del dron, así como el control de altura y posición son ejecutados por una placa controladora integrada al sistema, marca Pixhawk [38]. El desarrollo del software del controlador no fue parte del proyecto Termodron 1 y tampoco lo será en este.

A.2. Descripción física

Como ya se mencionó, el sistema implementado por Temodron 1 consta de una unidad de comunicación con el usuario (Estación de control) localizada en tierra, y la unidad dron. A continuación se describe la implementación física de ambas.

¹Los waypoints son las coordenadas de una misión que el dron deberá recorrer.

Dron

El dron está conformado por dos unidades, el cuadricóptero, y un módulo On-Board compuesto por una SBC (Computadora en una sola placa por sus siglas en inglés), la cámara térmica y sensores de proximidad. Por otro lado, el cuadricóptero esta formado por el armazón, motores, hélices, controladores de voltaje, batería, antenas de telemetría, radio 3DR (para el control remoto), gimbal, receptor DGNSS y la placa controladora Pixhawk. El esquema de conexión de todos estos componentes se puede ver en la figura A.2.

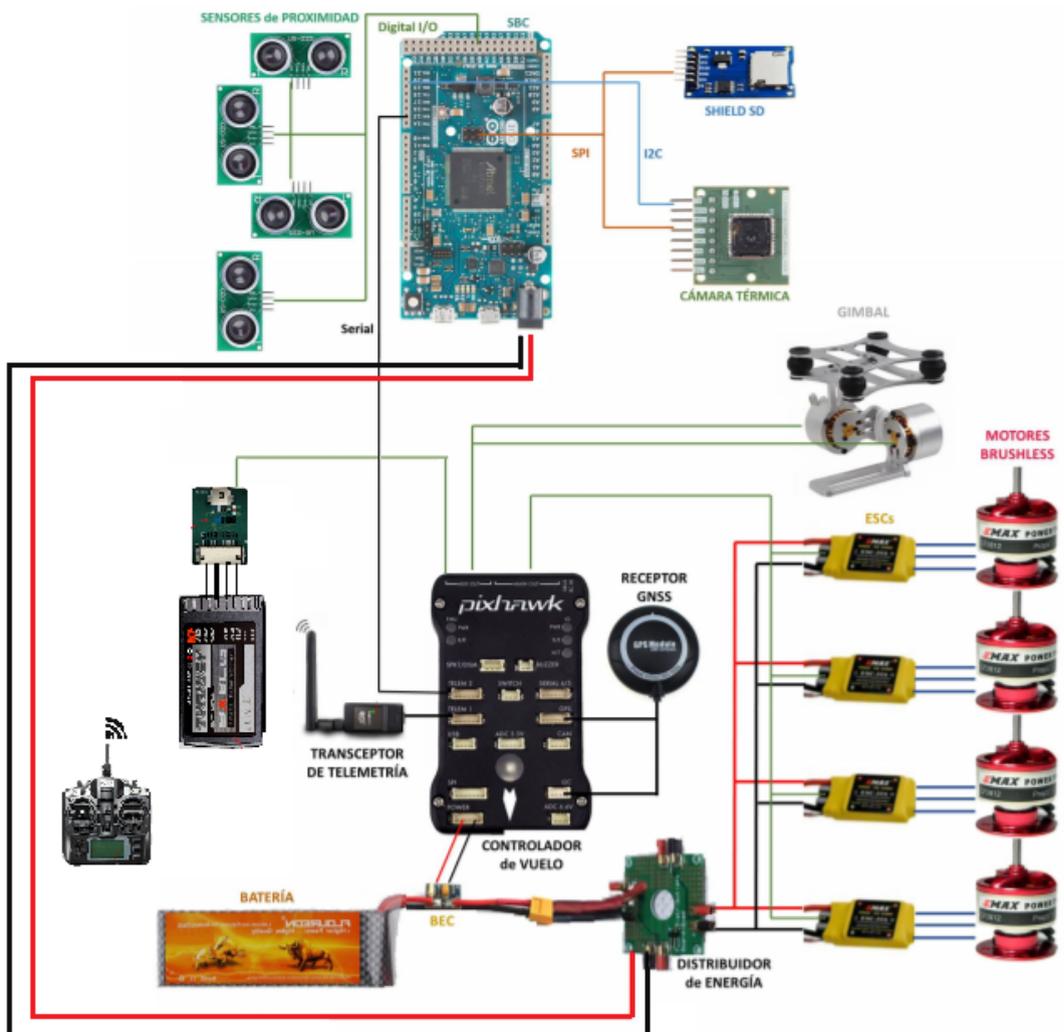


Figura A.2: Diagrama de componentes del Dron.

Telemetría

El dron se comunica con la GCS a través del módulo de telemetría [39], el cual es compartido entre la placa controladora y el módulo On-Board. De esta forma, mediante el uso de un buffer triestado (74244-SN74HCT244N), tanto el controlador de vuelo como el módulo On-Board son

capaces de enviar información a la GCS. Así mismo, para lo casos de emergencia, el dron puede ser controlado directamente con un control remoto, que se comunica con la placa controladora mediante una radio [39].

Batería

El diseño del dron se enfoca en lograr un sistema autónomo. Parte de lograr esto es conseguir que pueda volar el mayor tiempo posible sin tener que recargar la batería. Para lograr esto, se evalúa el sistema, considerando el peso del don, el empuje de los motores, el tiempo requerido de vuelo y la capacidad de la batería. Finalmente, se decide utilizar una batería LiPo (Litio-polímero) de 5000 mAh, 11.1 V. Con esta batería, y teniendo en cuenta el consumo de los motores, se calcula una autonomía de vuelo de 4 minutos.

Vuelo y GPS

La controladora de vuelo es la encargada de tomar las decisiones sobre el vuelo del dron controlando los motores. Posee una IMU² la cual cuenta con acelerómetro, magnetómetro, giroscopio y barómetro. Con estos instrumentos y el receptor GNSS, se implementa un filtro de Kalman extendido [40] que es capaz de estimar la posición y el movimiento de la aeronave para luego tomar decisiones de vuelo. Además, controla el gimbal (cuya función es mantener dicho módulo orientado en todo momento paralelo al plano del suelo) y registra información del sistema como tiempo de vuelo y estado de la batería.

El dron utiliza los motores Emax CF2822 [5] de 12 V con un empuje de 745 g, que consumen 14.5 A y hélices de fibra de carbono CW/CCW (clockwise / counterclockwise) de 10 pulgadas de diámetro por 4.7 pulgadas de paso. Con esto, el sistema de Termodrón 1 logra un tiempo de vuelo de minutos. Para lograr la distribución de energía desde la batería al controlador, el sistema utiliza un distribuidor de energía (un BEC [41]) y 4 ESCs de 30A.

On-Board

El modulo On-Board esta formado por una SBC (Single Board Computer) que corre Arduino DUE³, una cámara térmica Flir Lepton de 80x60 píxeles [21], y 4 sensores de proximidad USPRO US-015, con 4.5 m de alcance y 15° de apertura, por lo que no dejan ningún punto del Dron sin detectar. Además, se utiliza un Shield SD [22] para almacenar las imágenes tomadas por la cámara.

Por último, el dron posee un servo controlado por el controlador de vuelo, el cual se encarga de sostener la cámara horizontal al piso, sin importar la posición del dron.

Frame

Finalmente, todos los componentes antes mencionados se sostienen juntos mediante el uso del frame ZD550 de LJI de plástico, fibra de carbono y pocas piezas de metal, que lo hacen muy liviano (630 g).

²Unidad de Medida Inercial

³Esquemático Aduino DUE <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/arduino-Due-schematic.pdf>

GCS

La GCS es la encargada de establecer la comunicación entre el usuario y el dron. Para poder recibir los datos enviados por el usuario, es necesario que la misma posea una conexión a internet. Dicha conexión sirve además para recibir los datos del GPS diferencial. El diagrama del sistema se muestra en la figura A.3.

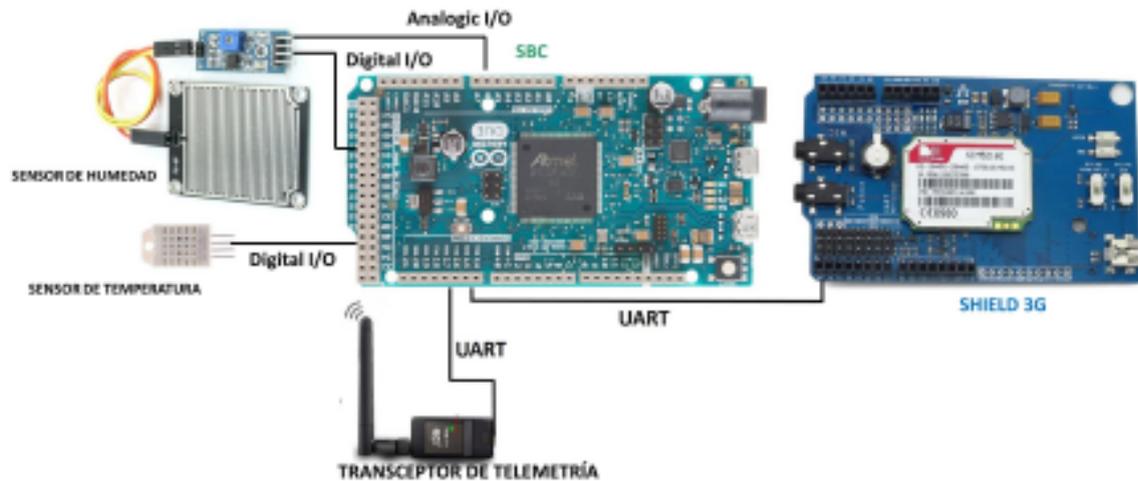


Figura A.3: Diagrama de componentes de la GCS.

Procesamiento y telemetría

Tanto para la GCS como para la On-Board, se utiliza la misma placa Arduino DUE. Para lograr la conexión a Internet, se usa una placa compatible con Arduino DUE, la ITEAD [42] 3G GSM, la cual trabaja con comandos AT [43].

Para establecer la comunicación entre la GCS y el Dron, se le conecta al Arduino un módulo de telemetría 3DR compatible con el del Dron (YKS 3DR [39] de 915 MHz).

B.1. Python y sus librerías

Python es un lenguaje de programación altamente utilizado alrededor del mundo. Es administrado por la Python Software Foundation y posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License.

La masividad de este lenguaje se explica por la implementación, que logró cumplir unos de los principales objetivos para los que se desarrolló: hacer la programación fácilmente entendible para personas con conocimientos básicos de programación.

Las principales ventajas del lenguaje son:

- Una sintaxis clara, que permite comprender o recordar más rápidamente el código fuente, tanto para quienes lo desarrollaron y deben revisar un programa realizado un tiempo atrás, así como para aquellos que deben utilizar o modificar un programa desarrollado por otros.
- Las posibilidades derivadas de ser multiplataforma, permitiendo su ejecución en un amplio y creciente número de entornos.
- Su condición de lenguaje interpretado, que facilita de manera significativa la tarea de desarrollo al permitir realizar pruebas parciales inmediatas y simultáneas de cualquier componente del programa.
- Menor curva de aprendizaje tanto para personas que solamente lo utilizarán en algunos desarrollos, así como primer lenguaje de programación para estudiantes de formación informática.
- La potencia derivada de su capacidad de implementar aplicaciones basadas en diferentes paradigmas de programación (imperativo, orientado a objetos, funcional), permitiendo utilizar el más apropiado a las características de cada desarrollo.
- Manejo de errores basado en excepciones.

- Extensas librerías estándar y módulos de terceros para la mayoría de las tareas.
- La facilidad de extender sus capacidades mediante una sencilla comunicación con módulos desarrollados otros lenguajes. Extensiones y módulos pueden ser fácilmente escritos en C y C++ (o Java para Jython, o .NET para IronPython).
- La disponibilidad de utilizar threads, una alternativa muy conveniente en casos como la ejecución simultánea de n tareas independientes, la priorización de algunos procesos sobre otros, etc.

Las características mencionadas anteriormente hacen que este lenguaje sea el elegido para implementar la estación de monitoreo y control.

Y para su aplicación en este proyecto específico, seleccionamos las bibliotecas: Dronekit y AWS IoT. Además, se utilizan librerías estándar disponibles para Python y librerías desarrolladas específicamente para el proyecto, donde se modularizan funciones de uso común que, al no compartir variables con la aplicación principal, pueden ser declaradas en otro archivo de Python para mejorar el orden del código.

Dronekit

Dronekit es una librería escrita en Python que fué especialmente diseñada para el control de drones.

La API (por sus siglas en inglés: *Application Programming Interface*) de Dronekit permite:

- Conectarse a un vehículo desde un script de Python, creando una clase con una amplia cantidad de parámetros que permiten modelar diferentes situaciones.
- Setear y consultar diferentes parámetros del dron y de la telemetría del sistema.
- Poner a disposición de manera asíncrona los datos que identifican los cambios que se van produciendo en los estados más importantes del dron.
- Enviar cualquiera de los comandos MAVLink disponibles en el protocolo.
- Manejar los parámetros (Waypoints) de las diferentes misiones.

Esta biblioteca constituye una herramienta completamente diseñada para UAVs, que fue desarrollada principalmente para computadoras a bordo con el fin de poder implementar capacidades de piloto automático, haciendo foco en funciones que agregan inteligencia al comportamiento del vehículo (visión artificial, planificación de rutas o modelado 3D) y requieren enlaces de baja latencia.

Es una herramienta que también tiene gran aplicación para estaciones terrestres, utilizando medios de enlace de mayor latencia como ser radio frecuencia.

Su interfaz comunica la aplicación con los vehículos utilizando el protocolo MAVLINK [44] , brindando facilidades en la conexión, información de estados y parámetros, y permitiendo el manejo de misiones y control sobre los vehículos conectados.

AWS IoT Device SDK

AWS IoT Device SDK es una librería que conecta el script de Python con la plataforma de Amazon a través del protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport: protocolo ultraliviano de transporte de mensajes del tipo publicación/subscripción[45]). Esta conexión se realiza usando certificados X.509 basados en mutua autenticación para mayor seguridad.

Una vez establecida la conexión, el SDK permite la comunicación con los llamados documentos sombra del dispositivo, utilizados para guardar la información del dispositivo en un formato JSON. Este documento se comparte entre el dispositivo y la plataforma de AWS IoT, teniendo así un reporte de información y control de variables por parte del usuario y del dispositivo conectado.

Los estados de información que releva el dispositivo tienen dos entradas: el estado notificado por el dispositivo y el estado deseado solicitado por el usuario, por lo que el usuario puede controlar al dispositivo solicitando un cambio de estado.

La lógica se realiza definiendo dos tipos de variables: Desired y Reported. Las variables Reported se usan con el fin de reportar parámetros asociados al estado, mientras que las variables Desired, tienen como fin que el usuario pueda determinar un valor deseable.

Librerías estándar

Las librerías estándar de Python utilizadas en este proyecto son las siguientes:

- **time**: Maneja tareas relacionadas con el tiempo.
- **math**: Proporciona acceso a las funciones matemáticas definidas.
- **threading**: Dota a las aplicación de soporte de ejecución de threads.
- **json**: Aporta las funciones que permiten la codificación y decodificación de los datos en formato json de intercambio de datos.
- **sys**: Provee variables y funcionalidades, directamente relacionadas con el intérprete.
- **RPi.GPIO**: Controla los canales de Raspberry Pi GPIO.
- **socket**: Proporciona una forma de comunicación entre procesos.
- **serial**: Proporciona funciones para la comunicación serial.

Los detalles sobre las librerías estándar se pueden encontrar en la biblioteca de librerías de Python [46].

Librerías desarrolladas

A continuación se describen las librerías de Python desarrolladas en este proyecto. El desarrollo de estas librerías permite una ejecución más prolija del código implementado en la estación de control.

Librería Logger

La librería Logger contiene un conjunto de funciones que ayudan a generar un registro de lo sucedido en la aplicación que será utilizado para generar reportes de errores y eventos con el fin de obtener información para continuar con las mejoras del sistema.

Las funciones implementadas son:

- **logEvento(var, string)**: Guarda en un archivo de texto con el nombre ingresado en el parámetro “var” lo ingresado en la variable indicada en el parámetro “string”.

Librería Imagen

La librería Imagen está conformada por funciones que permiten interpretar los datos RAW de las fotos enviados desde OnBoard. En esta librería se distinguen dos tipo de recepción de fotos, las recibidas de forma instantánea luego de ser tomadas, y las recibidas desde la SD (luego del aterrizaje). Las funciones implementadas en esta librería son:

- **ActualizarImagen(info, nimg, flagsd)**:
Recibe en el parámetro **info** la imagen como un array de 60x80 píxeles con los valores RAW y la guarda en un archivo BMP con el nombre de Imagen(“**nimg**”). En el parámetro **flag_sd** se indica si se recibió una Imagen desde la SD.
- **calcularRojo(temper)**:
Cálculo del nivel de Rojo según la temperatura **temper**.
- **calcularVerde(temper)**:
Cálculo del nivel de Verde según la temperatura **temper**.
- **PrepararImagen()**:
Prepara el archivo BMP mediante la escritura del encabezado del mismo.
- **RAWThermalToCelsius(thermalimage)**:
Cambia el formato de imagen **thermalimage** de RAW a °C.

Librería Mail

Esta librería mail implementa la función para establecer el envío de mails al usuario.

- **SendAnEmail(nimg, nsd, ntxt, ReceiverEmail)**
Recibe el número de imágenes (**nimg** y **nsd**, según sea instantánea o de la sd) y logs (**ntxt**) a enviar al usuario, y el mail a enviar la información (**ReceiverEmail**).

B.2. Descripción de la implementación de software

Como se menciona en el capítulo 7.2.2, todos los threads comparten el mismo espacio de datos, lo que les permite implementar un acceso global a las variables comunes.

A continuación, se realiza una explicación del software implementado, detallándose las funciones utilizadas en los threads y los conceptos asociados a las variables más representativas utilizadas.

Cabe mencionar que en el código fuente, se realizan numerosos comentarios que explican las funciones, variables y acciones definidas, con el objetivo de facilitar la comprensión y utilización de los programas por parte de futuros programadores.

Definición de los threads

Cada uno de los threads definidos están asociados a funciones que implementan las acciones detalladas en el capítulo 7.2. Estas funciones son:

- def Thread_DRON()
- def Thread_AWS()
- def Thread_ACT_ESTACION()
- def Thread_GPS()
- def Thread_ComOnBoard()

Para inicializar un thread se le asigna un nombre único y se identifica la función con la que está asociado. A modo de ejemplo, para inicializar el thread “Thread_Dron” se define la siguiente sentencia:

```
Dron_Com=threading.Thread(name="DRON_THREAD",target=Thread_DRON)
Dron_Com.start()
```

Como se observa en el código, en el atributo “target” se indica la función asociada al objeto “thread”. Para iniciar un thread, se utiliza el método “start()”.

También vale la pena mencionar, que, en cada función definida, se deben indicar cuales de las variables accedidas por la función son de carácter global, lo que las hace accesibles por todas las funciones.

VARIABLES GLOBALES

Las variables globales se pueden agrupar de la siguiente manera:

- **Parámetros del dron**
 - **vehicle** (Clase de Dronekit): Se obtienen los estados del dron y se referencia a todos los parámetros configurables como atributos. Se crea al establecer una conexión con el dron.

- **lastHeartbeat** (Float): Tiempo transcurrido desde el último heartbeat recibido desde el dron.
- **gps0**: (Dic¹) Información del GPS:
 - eph (Int) – Dispersión de la precisión horizontal (HDOP).
 - epv (Int) – Dispersión de la precisión vertical (VDOP).
 - fix type (Int) – 0-1: no fix, 2: 2D fix, 3: 3D fix.
 - satellites visible (Int) – Numero de satélites visibles.
- **homeLocation** (Dic): Información de ubicación de referencia de la estación.
 - lat – Latitud.
 - lon – Longitud.
 - alt – Altitud en metros relativo al nivel del mar.
- **attitude** (Dic): Pitch, Yaw y Roll del dron.
- **battery** (Dic): Información del estado de batería:
 - voltage (Int) – Voltaje en mV.
 - current (Int) – Corriente en mA.
 - level (Int) – Porcentaje de carga.
- **locationGlobalFrame** (Dic) : Información de ubicación en sistema wgs84 (World Geodetic System 1984) de coordenadas.
 - lat – Latitud.
 - lon – Longitud.
 - alt – Altitud en metros relativo al nivel del mar.
- **locationGlobalRelativeFrame** (Dic) : Información de ubicación en sistema wgs84 de coordenadas, con altura relativa.
 - lat – Latitud.
 - lon – Longitud.
 - alt – Altitud en metros relativo a la altura del atributo “homeLocation”.
- **velocity** (Dic): Información de velocidad en los tres ejes [vx (m/s), vy (m/s), vz (m/s)].
- **mode** (String): Modo de vuelo del dron.
- **armed** (Bool): Estado de armado dron.

■ Banderas

- **FlagStartMission** (Bool): Estado de sistema para ejecutar misión.
- **FlagVAR** (Bool): Indicador de nuevas variables a reportar a AWS.
- **FlagUpdate** (Bool): Estado auxiliar para reporte periódico a AWS.
- **FlagAcople** (Bool): Estado acople.

¹El término “Dic” hace referencia a los Diccionarios, que son estructuras de datos de Python que permiten asociar una clave con uno o varios valores del mismo o de diferentes tipos, a los efectos de su almacenamiento y recuperación. Estas estructuras permiten un manejo muy eficiente de las relaciones entre datos.

- **FlagCarga** (Bool): Estado recarga.
 - **FlagNewMission** (Bool): Nueva misión cargada por el usuario desde AWS.
 - **FlagLand** (Bool): Indicador de comando de aterrizaje solicitado.
 - **FlagRTL** (Bool): Indicador de comando de retorno a la estación solicitado.
- **Reporte AWS**
 - **cliente** (Clase AWS IoT): Utilizada para las operaciones con la plataforma AWS IoT.
 - **updateTAG** (dic): Información para reporte de AWS, con la siguiente sintaxis:


```
{
            "reported" : [],
            "desired" : []
          }
```

Funciones

A continuación se describen las funciones utilizadas en cada uno de los thread:

- **Thread Dron**
 - **CallbackAtributos(self, attrName, value)**: Función que es llamada asincrónicamente, cuando se modifican atributos del dron. En el parámetro “attrName” se indica el nombre del atributo modificado y en el parámetro “value” el nuevo valor. Se indica el cambio de una variable por vez.
 - **ReseteoWaypoints()**: Función utilizada para borrar los parámetros actuales de una misión.
 - **CargarWaypoints(Waypoints)**: Función utilizada para generar una misión. El parámetro “Waypoints” es una estructura de tipo diccionario que contiene los atributos que definen la nueva misión a ser ejecutada.
 - **ArmarDron()**: Función utilizada para cambiar el estado de un dron a modo “armado”.
 - **ModoDron(modos)**: Función utilizada para cambiar de modo de vuelo.
 - **DistanciaMetros(Coord1, Coord2)**: Función utilizada para calcular la distancia entre las coordenadas globales “Coord1” y “Coord2”.
 - **DistanciaWaypoint()**: Función utilizada para calcular la distancia entre la posición actual y el próximo punto de la misión.
- **Thread AWS**
 - **CallbackDelta(payload, responseStatus, token)**: Función asíncrona llamada cuando existe variación en los estados reportados a la plataforma de AWS.
 - **ActualizarAWS(data, **kwargs)**: Función para actualizar estados en plataforma de AWS.

- **CallbackActualizacion(payload, responseStatus, token)**: Función asíncrona de respuesta sobre estado de actualización de la plataforma AWS.
 - **TimerActualizacion()**: Función que ejecuta actualización periódicamente de datos a AWS.
- **Thread Base**
 - **MoverBase()**: Función para comandos del motor stepper
- **Thread GPS**
 - **EnviarRtcmMsg(data)**: Función para enviar mensajes de corrección diferencial a controlador de vuelo
 - **IniciarSocket()**: Función para iniciar la conexión con puerto UDP
- **Thread ComOnBoard**
 - **LeerArray()**: Función para recibir array de datos desde computadora a bordo.
 - **EnviarFlags()**: Función para enviar banderas solicitadas por computadora a bordo
 - **RecibirDataImagen()**: Función para recibir nueva imagen
 - **RecibirDataLog()**: Función para recibir un nuevo log

B.3. Corrección de posición global

La posición global de un cuerpo en la tierra, es generalmente calculada mediante la utilización de datos provistos por los tantos satélites que orbitan la tierra. Estos datos son conocidos como señales GNSS (Global Navigation Satellite System).

Sin embargo, hay casos en que los datos GNSS no son suficientemente precisos para calcular la posición de un cuerpo. Es aquí que entra en juego el DGNSS. Este sistema, utiliza además de los satélites, estaciones en tierra para calcular la posición de cuerpos en la tierra de forma más precisa. Hay varias técnicas para calcular estas posiciones: DGPS, RTK y WARTK. En este proyecto, se utiliza la tecnología RTK.

El Real-Time Kinematic (RTK)[47] es una técnica de navegación satelital basada en el uso de medidas de fase de navegadores con señales GPS, donde una sola estación de referencia proporciona correcciones de posición en tiempo real, obteniendo una exactitud mayor a la del GPS e incluso a la del DGPS.

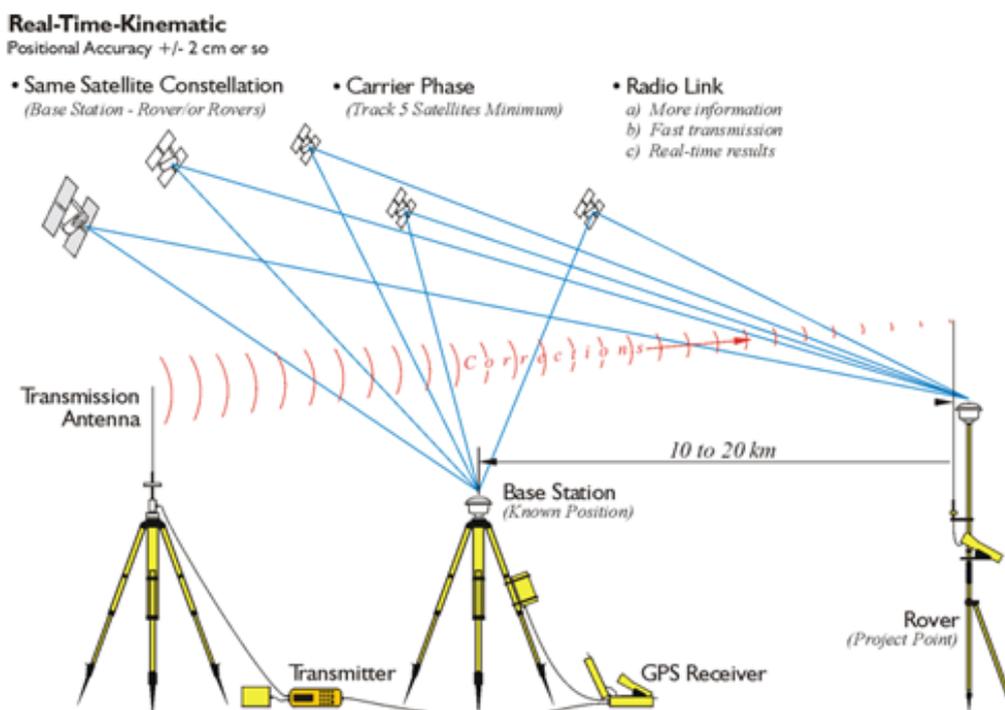


Figura B.1: Funcionamiento del RTK²

Los receptores “normales” basados en navegación por satélite, comparan una señal pseudoaleatoria que es enviada desde el satélite con una copia interna generada por la misma señal. Puesto que la señal del satélite tarda tiempo en alcanzar al receptor, las dos señales no se “alinean”

²Imagen obtenida de : <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-5-resolving-errors/real-time-kinematic-rtk/>

correctamente; la copia del satélite se retrasa en referencia a la copia local. Al retrasar progresivamente la copia local, las dos señales se alinearán correctamente en algún momento. Este retraso es el tiempo necesario para que la señal alcance al receptor, y del resultado de esto puede ser calculada la distancia al satélite.

La precisión de la medición resultante es generalmente una función de la capacidad electrónica del receptor para comparar exactamente las dos señales.

RTK sigue el mismo concepto general, pero usa el portador de satélite como su señal, no los mensajes contenidos en el mismo, por lo que los rangos provistos por esta técnica resultan varios órdenes de magnitud más precisos que los disponibles por posicionamiento basado en código.

En la práctica este rango posee errores (delays atmosféricos, errores de reloj de satélites), para eliminarlos y aprovechar las ventajas de la precisión en la medida basada en portadoras, los sistemas de RTK utilizan un solo receptor como estación base³ y un número determinado de unidades móviles. La estación base retransmite la fase del portador que hace mediciones, y las unidades móviles comparan sus propias medidas de fase con las que está recibiendo la estación base usando algoritmos que incorporan resolución de ambigüedad y corrección diferencial.

La dificultad para implementar un sistema RTK radica en alinear correctamente las señales. Las señales de navegación se codifican deliberadamente para permitir que sean alineadas fácilmente, donde cada ciclo del portador es similar al otro. Esto provoca que sea extremadamente difícil saber si se han alineado correctamente las señales o si está corrida en un ciclo, introduciendo un error de uno o más ciclos. Un proceso llamado “resolución de ambigüedad” es necesario para determinar el número de ciclos completos, que a pesar de su complejidad los receptores de GNSS son capaces de resolverlo casi instantáneamente. Sin embargo, ninguno de estos métodos pueden reducir este error a cero. Para más información sobre este tema, ver [4].

³En este caso se utiliza la estación del cerro, ubicada a aproximadamente 9 km (por aire) de Montevideo.

B.4. Diseño de la baliza

A continuación se realiza el detalle de los datos obtenidos y las pruebas realizadas para la implementación de una baliza que sirva como asistencia al aterrizaje del dron.

Análisis de la cámara

La cámara utilizada por el dron para la detección de puntos calientes es una FLIR LEPTON y posee las siguientes características:

- Longitud de onda detectada: 8-14 μm .
- Píxeles: 80x60.
- Sensibilidad térmica: Menor a 50 mK.
- Rango óptimo de temperatura: -10 a 65 $^{\circ}\text{C}$.
- Ángulo de apertura: 51 $^{\circ}\text{C}$ horizontal, 37,1 $^{\circ}\text{C}$ vertical.

Todos los objetos que vemos cotidianamente emiten radiación infrarroja, pero la misma es invisible al ojo humano. Por ejemplo el suelo, el agua y las rocas a temperatura ambiente de 25 $^{\circ}\text{C}$ tienen una longitud de onda dominante de 9.66 μm , por lo que las cámaras infrarrojas son ideales para esta función.

Radiometría

La radiometría⁴ afecta la función de transferencia entre el flujo incidente a la cámara y la salida del píxel. La cámara posee dos modos de radiometría: uno habilitado y otro deshabilitado, los cuales se pueden comparar en la figura B.2.

Ambos modos producen idénticas performances, pero para aplicaciones en las que se pretende usar la salida proporcional a la temperatura de la imagen observada, es recomendable habilitarla debido a que la conversión es constante en todo el rango de operación de la cámara (esto solo funciona si el algoritmo de AGC (Automatic Gain Correction en inglés) está apagado, sino dicho algoritmo opaca ambos modos).

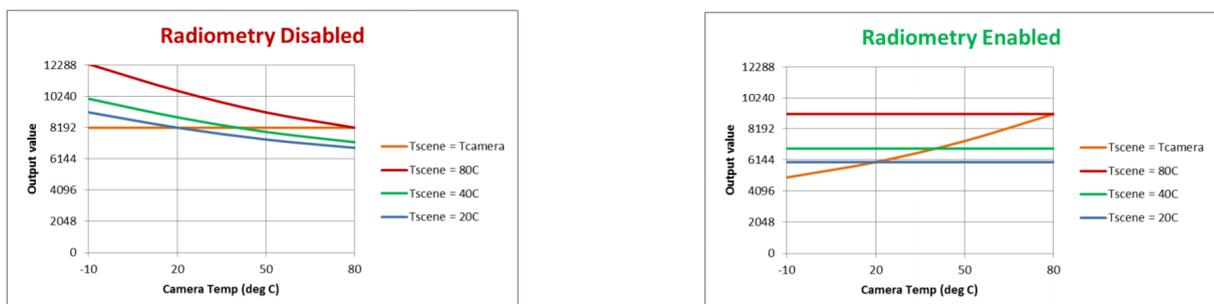


Figura B.2: Comparación de funcionamiento con radiometría habilitada y deshabilitada.⁵

⁴Ciencia que se encarga del estudio de la medida de la radiación electromagnética.

Con la radiometría deshabilitada, la cámara compara su temperatura interna (a la que asigna el valor de 8192 para que caiga en la mitad del rango de 14 bits) con la temperatura de cada píxel, y luego asigna los valores de la salida de manera aproximadamente lineal, obteniéndose un valor RAW para cada píxel. Así, teniendo la pendiente de esta recta, podemos estimar el valor esperado para determinada temperatura de píxel. Por lo tanto, esto lo hace dependiente de su temperatura interna y del entorno, siendo acorde a las observaciones realizadas durante nuestra experiencia con la cámara (no se pueden comparar dos fotos distintas).

Habilitando la radiometría, la cámara realiza ajustes para que la salida sea independiente de su propia temperatura. Con esto se fija la escala de salida, logrando que la misma sea función de la imagen que se está relevando y no de la temperatura de la cámara, lo que hace posible comparar imágenes distintas entre ellas si se encuentran a la misma distancia. A pesar de esto, en la práctica para una misma temperatura sensada con la cámara en distintas condiciones de temperatura interna, existen pequeñas variaciones a la salida, por lo que un estudio más en detalle es recomendado. Así, la diferencia en la salida de la cámara entre dos diferentes temperaturas se mantiene constante, al contrario que cuando se desactiva (que decrece al aumentar la temperatura de la cámara).

La radiometría deshabilitada fue la configuración elegida por Termodron 1 y por ende es la configuración a utilizar en la experiencia. Luego de la misma se determinará la conveniencia de activarla o no.

AGC

El algoritmo de corrección de ganancia automática (Automatic Gain Correction en inglés) convierte la imagen térmica de 14 bits en una imagen con contraste mejorado adaptada para una mejor representación visual y se encuentra basado en la aplicación de un histograma no lineal al mapeado de los colores.

Consideraciones previas

A continuación se realiza un breve resumen de las leyes consideradas pertinentes para comprender el funcionamiento de la cámara.

Ley de Stefan-Boltzmann

Establece que el espectro total radiante del flujo de salida de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura.

$$W = \sigma.T_e^4 \quad (\text{B.1})$$

con T_e temperatura absoluta de la superficie y $\sigma = 5,67x10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$ constante de Boltzmann. La potencia emisiva superficial de una superficie real es menor que la de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$W = \epsilon.\sigma.T_e^4 \quad (\text{B.2})$$

⁵Fuente: [48]

con ϵ emisividad, de valores entre 0 y 1.[49]

Ley de desplazamiento de Wien

Establece la relación entre la verdadera temperatura de un cuerpo negro en Kelvin y la longitud de onda de su pico espectral. La longitud de onda a la que se emite la mayor cantidad de energía se reduce cuando la temperatura aumenta, estableciendo así una relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura.

$$\lambda_{max} = \frac{0,0028976mK}{T} \tag{B.3}$$

con T temperatura del cuerpo negro en Kelvin y λ_{max} longitud de onda del pico de emisión en metros.

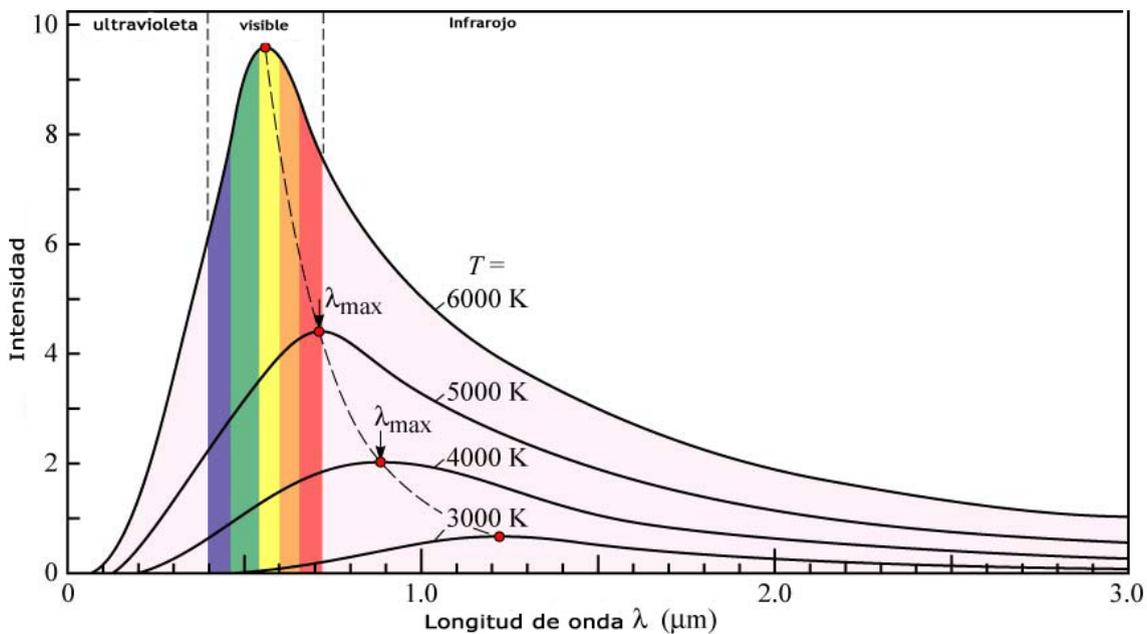


Figura B.3: Ley de desplazamiento de Wien⁶

Ley de Planck

La ley de Planck describe la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico en una temperatura definida. La longitud de onda en la que se produce el máximo de emisión viene dada por la ley de Wien y la potencia total emitida por unidad de área viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann. Por lo tanto, a medida que la temperatura aumenta el brillo de un cuerpo cambia del rojo al amarillo y al azul. La intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro con temperatura T y frecuencia ν es:

⁶Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_desplazamiento_de_Wien

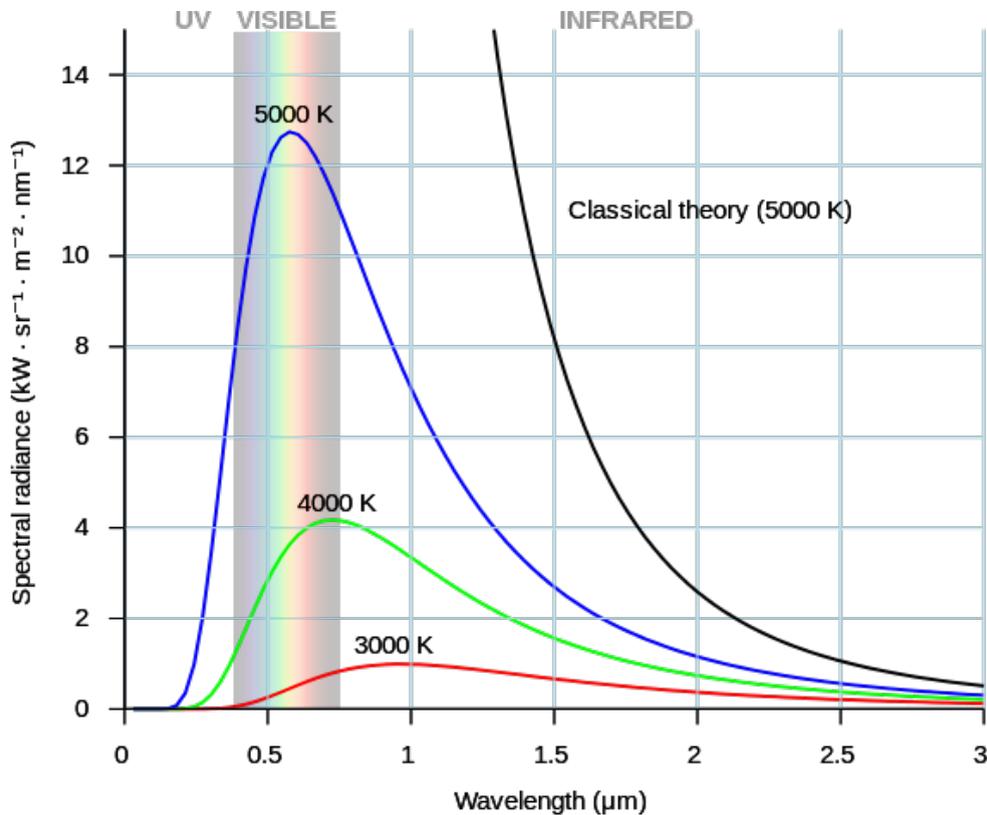


Figura B.4: Ley de Planck⁷

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \tag{B.4}$$

Esto permite afirmar que en el rango de LWIR a pesar de haber más radiación emitida por objetos en la tierra, la cantidad de radiación varía menos con la temperatura.

Ley de Kirchoff

Cuando un objeto está en equilibrio térmico, la cantidad absorbida será igual a la emitida.

Emisividad

La temperatura real de un cuerpo es convertida en energía radiante llamada flujo radiante (medido en Watts) y su concentración saliendo de un objeto es su temperatura radiante. Generalmente existe una fuerte correlación entre la temperatura real del objeto y el flujo radiante desde el objeto y es en esto en lo que se basa el sensado remoto de infrarrojos. Desafortunadamente la relación no es perfecta (siendo la medición de la temperatura radiante siempre menor a la verdadera temperatura cinética del cuerpo), lo que se atribuye a una propiedad llamada emisividad.

⁷Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Planck

La emisividad de los objetos es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura. La emisividad direccional espectral se define como la razón entre la intensidad emitida por la superficie en una dirección particular y la intensidad que sería emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda.

El coeficiente de emisividad (ϵ), es un número adimensional que relaciona la habilidad de un objeto real para irradiar energía térmica, con la habilidad de irradiar si éste fuera un cuerpo negro:

$$\epsilon = \frac{\text{radiación emitida por una superficie}}{\text{radiación emitida si fuera un cuerpo negro}} \quad (\text{B.5})$$

Un cuerpo negro, por consiguiente, tiene un coeficiente $\epsilon = 1$, mientras que en un objeto real, ϵ siempre se mantiene menor a 1.

Considerando fuentes externas como el sol, se sabe que la radiación infrarroja viaja en línea recta desde la fuente y puede ser reflejada y absorbida por superficies de materiales en su camino. En el caso de la mayoría de los objetos sólidos que son opacos al ojo humano, parte de la energía IR que choca contra la superficie es absorbida y parte es reflejada. De la energía absorbida, una porción es re-emitida y parte es reflejada internamente. Para los objetos transparentes al ojo humano sucede lo mismo, pero además parte de la energía atraviesa complementemente el mismo.

Mientras más pulida la superficie, más energía IR refleja. Por lo tanto las características de la superficie influyen en su emisividad. Una pieza pulida de metal tiene una emisividad considerablemente mayor que la misma pieza con su superficie áspera, sin acabado (su superficie evita que se refleje tanto).

Por ejemplo el agua destilada tiene emisividad cercana a 1 (0.98-0.99) entre 8 y 14 micrómetros [50], la piel humana tiene emisividad de 0.97 a 0.98, mientras que los metales no oxidados poseen emisividad baja aumentando con su temperatura (ver [51]). Por ejemplo en el aluminio no oxidado es de 0,02.

La emisividad se ve afectada por el color (los más oscuros generalmente absorben y emiten mejor), aspereza, humedad (a mayor humedad absorbe y emite mejor), compactación, porción del espectro considerado (considerada constante generalmente en el rango 8-14 micrómetros, mientras que entre 3 y 5 micrómetros puede variar), ángulo de visión, etc.

Por lo tanto se debe tener en cuenta la emisividad al medir a distancia la temperatura real de un objeto, lo cual se realiza aplicando la ley de radiación de Kirchoff, previamente mencionada.

Esta ley establece que si la reflectividad aumenta entonces la emisividad debe decrecer. Por ejemplo el agua absorbe casi toda la energía incidente pero refleja muy poca, por lo tanto el agua es un muy buen emisor y su emisividad es cercana a 1. Por el contrario un pedazo de metal refleja la mayoría de la energía incidente, absorbiendo muy poco, con lo que su emisividad es mucho menor a 1, por ende objetos de metal como los autos se ven fríos. Gracias a esta ley se modifica la ley de Stefan-Boltzmann (también mencionada anteriormente) para tener en cuenta la temperatura y su emisividad, creando una estimación más precisa del flujo irradiado saliente.

Otros factores a tener en cuenta son: la conductividad térmica, la capacidad térmica y la inercia térmica. Esto escapa del alcance de este proyecto pero se plantea para una futura consideración de sucesivos proyectos.

Medición de temperatura

Resumiendo todo lo mencionado, además de la radiación emitida, un objeto reacciona a la radiación incidente de sus alrededores absorbiendo y reflejando una porción de ella o dejando parte de la misma atravesarla. A su vez, no toda la radiación que recibe la cámara proviene del objetivo, por lo que para medir la temperatura precisamente hay que remover la radiación de otras fuentes en un proceso llamado compensación. Con esta intención en mente recordamos la Ley de Kirchoff de Radiación Térmica:

$$W = \alpha W + \rho W + \tau W \tag{B.6}$$

que puede ser simplificada a:

$$1 = \alpha + \rho + \tau \tag{B.7}$$

con α absorción de la energía incidente, ρ reflexión y τ transmisión, variando entre 0 y 1 estos valores.

Recordando las leyes de Planck y de Stefan-Boltzman ya mencionadas y considerando la definición de emisividad para dar cuenta de la fracción de energía comprimida en el rango de longitud de onda pertinente a la cámara, podemos escribir la ley de Stefan-Boltzman como:

$$W = \epsilon \sigma T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \tag{B.8}$$

Por lo que se puede relacionar la señal digital generada en la escena con la temperatura absoluta en Kelvin siempre y cuando estos objetos sean cuerpos grises (es decir cuando la emisividad no dependa de la longitud de onda, consideración posible por la limitación en el rango espectral de la cámara).

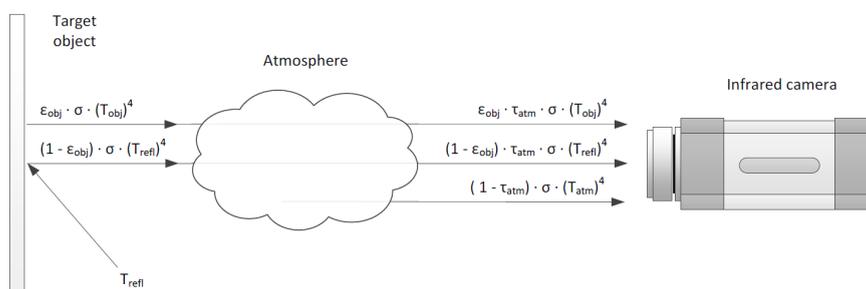


Figura B.5: Medición de la radiación emitida por un cuerpo⁸.

La radiación total que llega a la cámara (W_{Tot}), como se puede observar en la figura B.5, proviene de tres fuentes:

- La emisión del objetivo (W_{Obj}), parte de la cual es absorbida por la atmósfera en función de la transmitancia de ella (τ_{atm}).
- La emisión de los alrededores reflejada por el objeto (W_{Refl}) (debida a que los cuerpos grises tienen una reflectividad mayor a 0), que es absorbida de igual manera por la atmósfera.
- La emisión de la atmósfera (W_{Atm}).

Entonces:

$$W_{Tot} = W_{Obj} + W_{Refl} + W_{Atm} \quad (B.9)$$

Y sustituyendo cada elemento por su expresión obtenemos:

$$W_{Tot} = \epsilon_{Obj} \tau_{Atm} \sigma (T_{Obj})^4 + (1 - \epsilon_{Obj}) \tau_{Atm} \sigma (T_{Refl})^4 + (1 - \tau_{Atm}) \sigma (T_{Atm})^4 \quad (B.10)$$

Con ϵ_{Obj} emisividad del objeto, σ constante de Stefan-Boltzmann, τ_{Atm} transmitancia de la atmósfera, T_{Obj} temperatura del objeto, T_{Refl} temperatura reflejada, T_{Atm} temperatura de la atmósfera, $(1 - \epsilon_{Obj})$ reflectividad del objeto y $\epsilon_{Atm} = (1 - \tau_{Atm})$ emitancia de la atmósfera.

De la ecuación B.10 se despeja la temperatura del objeto que se quiere medir:

$$T_{Obj} = \sqrt[4]{\frac{W_{Tot} - (1 - \epsilon_{Obj}) \tau_{Atm} \sigma (T_{Refl})^4 - (1 - \tau_{Atm}) \sigma (T_{Atm})^4}{\epsilon_{Obj} \tau_{Atm} \sigma}} \quad (B.11)$$

Para resolver esta ecuación los parámetros que deben ser suministrados son la emisividad del objeto, la temperatura reflejada, la transmitancia de la atmósfera y la temperatura de la atmósfera. La transmitancia de la atmósfera generalmente es estimada usando la distancia entre la cámara y la humedad relativa, siendo en general muy cercano a uno. La temperatura de la atmósfera se obtiene con un termómetro pero como su emitancia es muy cercana a cero este parámetro tiene poca influencia en la medida. Sin embargo, de la ecuación se extrae que la emisividad del objeto y la temperatura reflectada poseen una gran influencia en la medida de la temperatura y por eso deben ser medidas con la mayor precisión posible. Para procedimientos de calibración referirse a [53] y [52].

Por medio de las funciones de telemetría de la cámara se pueden obtener las temperaturas del FPA en Kelvin. Sustituyendo en la ecuación B.11, se puede compensar para obtener una correcta lectura de T_{Obj} . Para la cámara utilizada en este proyecto, dicha compensación debería ser aplicada por el usuario luego de calibrar, en un procesamiento posterior a la toma de la imagen y con la cámara en las mismas condiciones de la calibración, lo que no resulta práctico ni útil. Para el caso sugerido del cambio de cámara por una con radiometría, esta calibración sería introducida por el usuario como parámetros de compensación propios del instrumento, acorde a la fórmula B.11.

⁸Fuente de la imagen: [52]

Implementación de las balizas

El objetivo final es crear una baliza cuya temperatura sea superior a la de un ser vivo para que resulte inconfundible a una distancia preestablecida de 5 m mínimos (se estima esta distancia acorde al rango de la cámara y precisión del GPS).

Para esto, se evalúan distintas opciones para la realización de la baliza, teniendo en cuenta factores como el material, el valor nominal, el consumo, precio, tamaño y emisividad. Los materiales evaluados son:

- Resistencias.
- Lámparas dicroicas e incandescentes de alto consumo.
- Lámparas incandescentes de bajo consumo.
- Vaso con agua caliente.

Resistencias

Para el caso de las resistencias, se prueban diferentes tipos de resistencias, entre ellos las de película metálica, carbón y cerámicas, observando cuál es la que disipa más calor a la misma potencia.

A partir de esto se encuentra que el material que más disipa es la cerámica. Seguido, se prueban diferentes configuraciones y armados del sistema para producir una baliza que caliente lo suficiente y consuma lo menos posible, finalizando con el armado de una baliza constituida por 8 resistencias de 68Ω en paralelo, cubiertas por placas metálicas de 13 cm x 13 cm y aisladas con acrílico y kevlar.

El producto terminado se puede ver en la figura B.6.

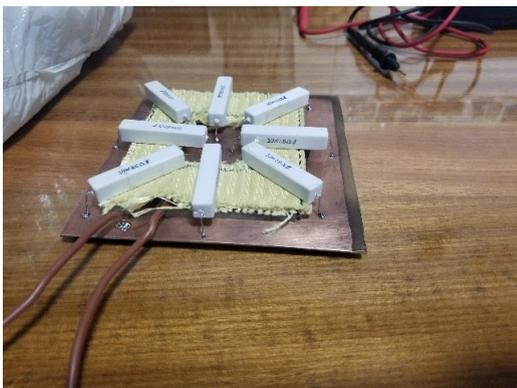


Figura B.6: Baliza realizada con resistencias y placas conductoras.

Tanto por el metal calentado, como por su elevado consumo la misma no puede ser utilizada como elemento final del sistema pero si como herramienta de testeo, ya que se comprueba que el calor emitido por las resistencias se encuentra dentro del rango de detección de la cámara y por ende un conglomerado de las mismas resulta en un cuerpo detectable por la cámara.

Lámparas dicroicas e incandescentes

En el caso de éstas lámparas, al testearlas se observa que la potencia necesaria para que disipen la energía suficiente para ser detectadas por la cámara es demasiada. Por ello se decide descartarlas.

Lámparas incandescentes de bajo consumo

Estas lámparas, aunque son de bajo consumo y por tanto no llegan a temperaturas muy elevadas, acopladas a un cono metálico reflector (como vienen en las linternas) pueden llegar a disipar la energía necesaria para ser detectadas.

Para estas lámparas se comprueba que al subir el voltaje de alimentación y esperando algunos minutos, se llega a la energía suficiente para que sean detectados por la cámara.

Vaso con agua caliente

Aunque el agua no es propicia para la realización de una baliza, se decide testearla debido a su alta emisividad. Esto sirve de comparación con los otros materiales, ya que teóricamente materiales con mayor emisividad son más fáciles de ser detectados por la cámara.

Pruebas realizadas y resultados obtenidos

Todas las pruebas se realizan con el objeto de estudio a una altura de 40 cm y la cámara a 51 cm, perpendicular al piso. La distancia máxima entre ambos puntos es de 5 m, con marcas cada 1 m, como se observa en la figura B.7



Figura B.7: Fotos del sistema implementado para la realización de las pruebas

La temperatura de los objetos se registra utilizando una termocupla y un multímetro DT5808. Así mismo, se registra la temperatura ambiente y se regula el voltaje de alimentación en cada caso, para que la temperatura permanezca en el rango de interés.

El estudio se realiza comparando los datos crudos (RAW) obtenidos por la cámara⁹ para cada

⁹Estos datos se obtienen mediante la consola de la OnBoard, con la cámara conectada a la misma, y utilizando la función `PicturePrint()`. Se imprimen en la consola de Arduino los valores RAW obtenidos por la cámara de forma instantánea cada vez que se toma una foto y se almacenan para su análisis posterior.

baliza a intervalos de 1 m¹⁰, comparándolos tanto con los de un cuerpo ubicado a la misma distancia como con los del entorno. Cuanto mayor sea la diferencia entre los datos obtenidos para una baliza y un cuerpo, mejor.

Baliza con resistencias cerámicas

El setup de los instrumentos de medida y la baliza utilizados para realizar esta prueba se muestra en la figura B.6.



Figura B.8: Setup del sistema para el testeo de la baliza de resistencias.

Los datos obtenidos durante la caracterización de la baliza creada con resistencias cerámicas se muestran en la tabla B.1.

Distancia (m)	Temp. (°C)	Píxeles (LxA)	Rango raw de baliza	Rango raw cuerpo	Rango raw ambiente
1	120	13 x 13	[7700;8100]	[7700;8000]	[7700;7800]
5	120	3 x 4	[7750;7900]	[7750;7950]	[7700;7950]

Tabla B.1: Resultados obtenidos para la caracterización de la baliza de resistencias.

A continuación se muestra una representación gráfica de los resultados obtenidos.

¹⁰Sólo se muestran los datos relevantes obtenidos a 1 m y a 5 m de distancia de la baliza y los valores mínimos y máximos de los datos RAW obtenidos para cada medición.

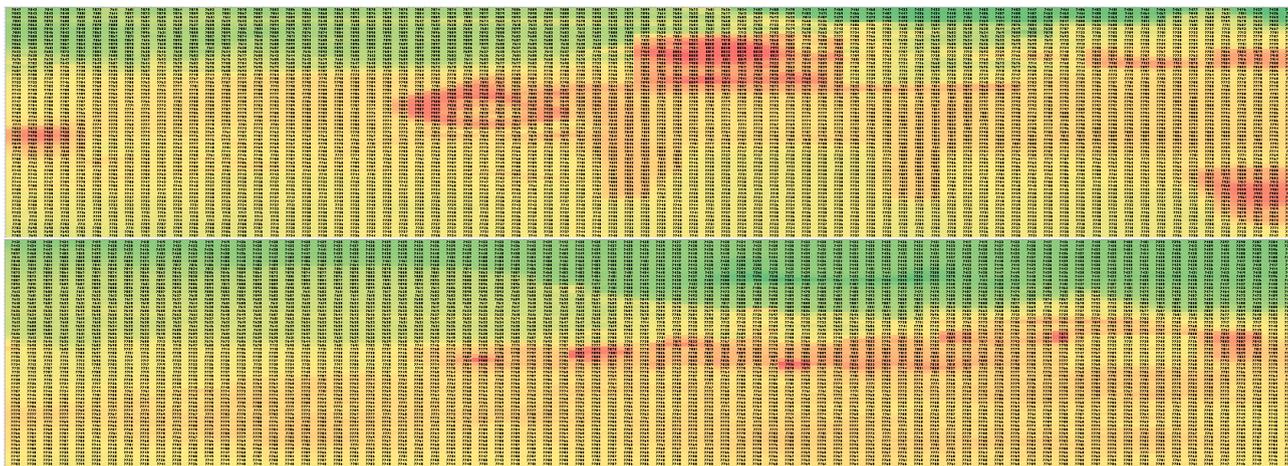


Figura B.9: Representación gráfica de los resultados a 1 m (arriba) y 5 m (abajo).

A partir de los resultados se puede ver que los datos crudos de la baliza obtenidos por la cámara disminuyen con la distancia. A su vez disminuye la cantidad de píxeles detectados. En este caso además, los valores RAW de la baliza son muy cercanos a los de un cuerpo humano, provocando que la baliza sea confundible con uno, lo que no es para nada deseable.

Baliza con lámpara incandescente

La baliza utilizada y su colocación para la realización de las pruebas se muestra en la figura B.10.



Figura B.10: Disposición de la lámpara incandescente para la realización de las pruebas.

A continuación se muestran los resultados de la caracterización de la baliza hecha con una linterna. En este caso, no se obtienen los valores de temperatura puesto que adjuntar una termocupla a la lámpara resulta imposible debido a su área acotada.

Distancia (m)	Temp. (°C)	Píxeles (LxA)	Rango raw de baliza	Rango raw cuerpo	Rango raw ambiente
1	-	1 x 2	[8000;8300]	[7800;8000]	[7600;8000]
3	-	No se detecta	-	-	-

Tabla B.2: Resultados obtenidos para la caracterización de la baliza de resistencias.

La representación gráfica de los resultados obtenidos se observa en la figura B.11. Se extrae que a partir de los 3 m la linterna ya no es detectada.

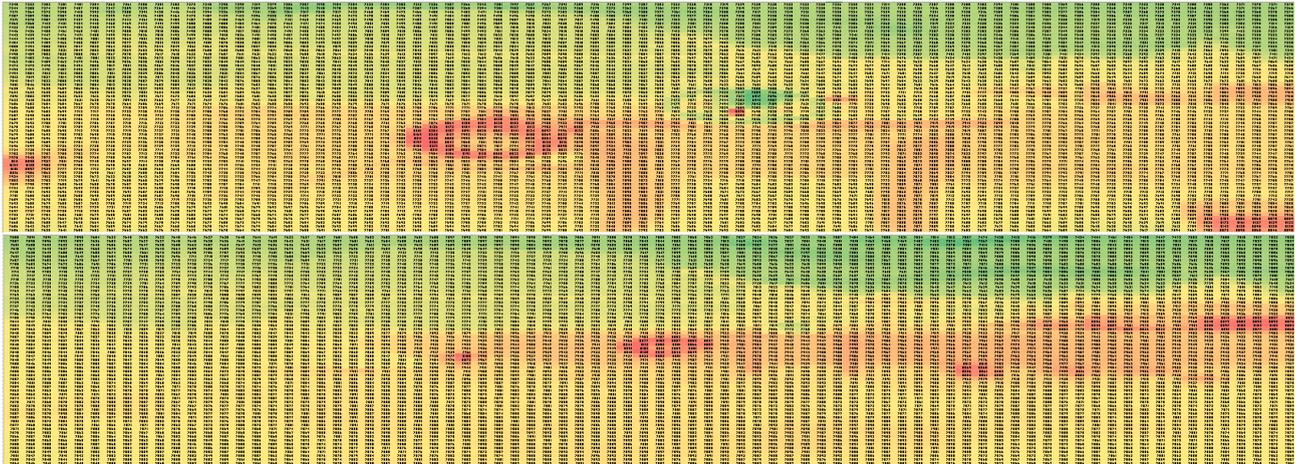


Figura B.11: Representación gráfica de los resultados a 1 m (arriba) y 3 m (abajo).

En este caso, la baliza no irradia suficiente energía como para ser detectada por la cámara a 5 m, que es el objetivo de esta prueba, por lo que su uso se descarta de inmediato.

Baliza con vaso de agua caliente

Por último, se caracteriza la detección de un vaso con agua caliente. La colocación de la baliza y la termocupla se muestran en la figura B.12. Los resultados obtenidos en las pruebas se muestran en la Tabla B.3.



Figura B.12: Colocación de la baliza e instrumentos de medida para la realización de las pruebas.

Distancia (m)	Temp. (°C)	Píxeles (LxA)	Rango raw de baliza	Rango raw cuerpo	Rango raw ambiente
1	73	8 x 13	[8800;9600]	[7600;7800]	[7700;7800]
5	73	1 x 2	[8900;9100]	[7700;8000]	[7600;7900]

Tabla B.3: Resultados obtenidos para la caracterización de la baliza hecha con agua caliente.

La representación gráfica de los resultados obtenidos se observa en la figura B.13.

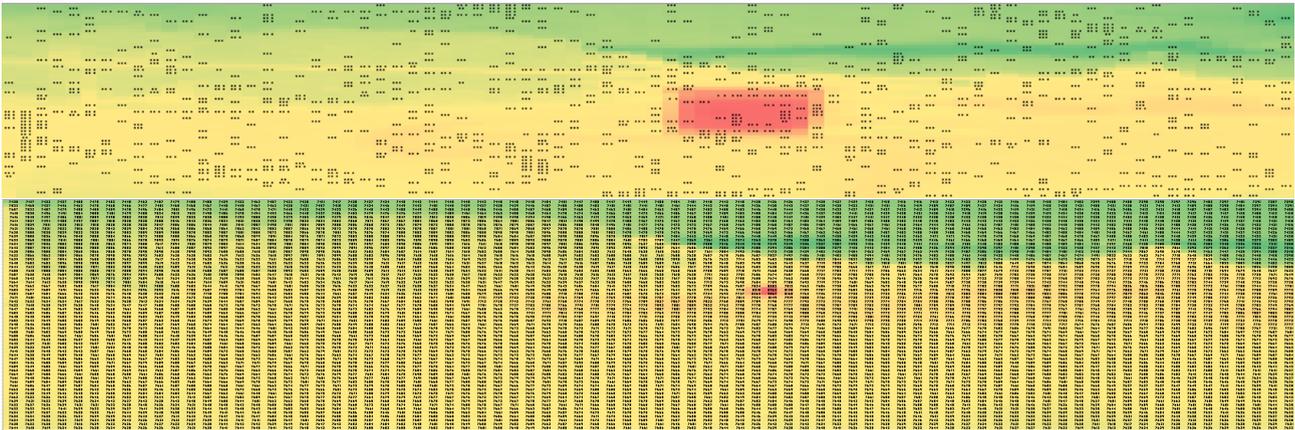


Figura B.13: Representación gráfica de los resultados a 1 m (arriba) y 5 m (abajo).

Los resultados anteriores muestran que los datos obtenidos por la cámara para el agua caliente son distinguibles de los de un cuerpo y del ambiente. Sin embargo, la cantidad de píxeles detectada sigue siendo baja a 5 m.

A partir de la caracterización de las balizas, se observa que ninguna es viable para los propósitos del proyecto, ya que no son distinguibles de un cuerpo a una distancia de 5 m. Como prueba de concepto, se señala que un material con alta emisividad como lo es el agua, es detectado mucho mejor que otros con baja emisividad (aluminio, vidrio, filamentos). Esto confirma el funcionamiento de la cámara estudiado y muestra que aún con materiales con alta emisividad (como el agua), los píxeles detectados a 5 m son pocos como para implementar un algoritmo de aterrizaje basado en ellos.

Además, no se encuentran en plaza materiales capaces de producir alta emisividad y de un tamaño reducido. Por este motivo es que se decide no continuar con la realización del aterrizaje preciso utilizando la cámara disponible, y se deja como recomendación la adquisición de otra cámara con un rango de detección mayor (por ejemplo, luz visible) o un modelo posterior de cámara térmica con radiometría como se menciona en la sección de recomendaciones para el uso de la cámara.

Transformación a BMP

Durante la realización de pruebas de las balizas se observa que para momentos muy próximos en el tiempo y con condiciones casi constantes, las imágenes BMP obtenidas difieren considerablemente.

Con el fin de estudiar estas diferencias, se toman 3 fotos consecutivas de un banco en el exterior a intervalos de 4 s y se estudia la representación BMP obtenida al procesar el RAW por el algoritmo de transformación heredado de Termodron 1.

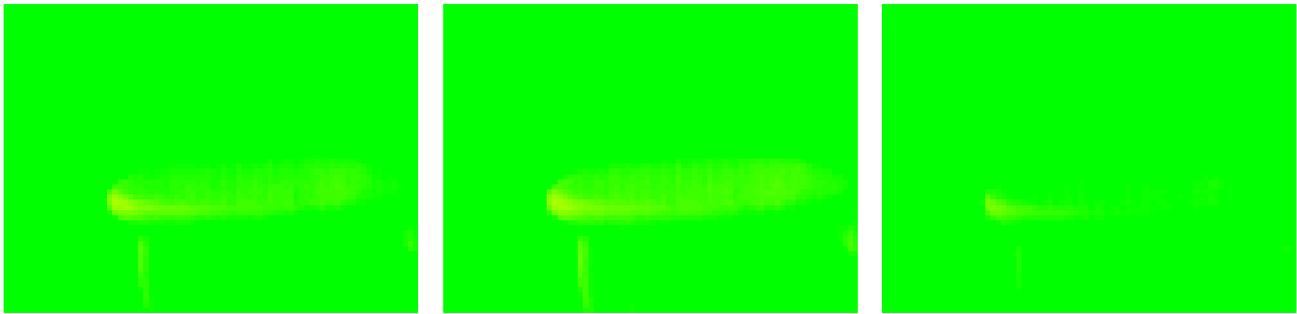


Figura B.14: Transformación a BMP de los valores RAW obtenidos para un banco.

Con el fin de poder comparar los datos RAW de cada imagen, se utiliza una escala de colores, como se muestra en la figura B.15.

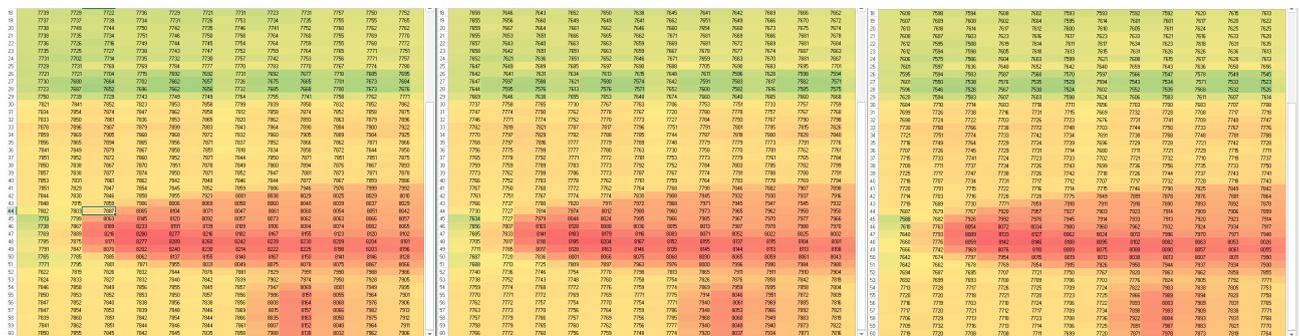


Figura B.15: Representación gráfica de los resultados obtenidos durante la prueba de la cámara, para un banco.

La no habilitación de la radiometría es descartada como causal del problema al haber realizado múltiples capturas en intervalos pequeños de tiempos con condiciones ambientales que se pueden considerar constantes, resultando en imágenes RAW con variaciones insignificantes. Una vez establecido que las imágenes RAW permanecen constantes, se aprecia una clara diferencia entre los datos RAW obtenidos por la cámara y la transformación a BMP de estos valores. A continuación se realiza un posible análisis de lo ocurrido observando el algoritmo.

El algoritmo de transformación de RAW a BMP recorre la imagen generando cada valor de píxel RAW a °C y luego pasa dicho valor a tres funciones que se encargan cada una de calcular cada color RGB (llamadas calcularAzul, calcularVerde y calcularRojo)¹¹. Se definen previamente dos temperaturas de interés: una máxima a partir de la cual toda temperatura superior se representa roja (llamada tmax_bmp) y una mínima (tmin_bmp), a partir de la cual toda temperatura inferior se representa verde. Para las temperaturas intermedias se le asigna valores de ambos colores acorde a dos ecuaciones distintas: una en calcularVerde y otra en calcularRojo (ya que el valor azul siempre es 0), que tienen en cuenta tanto el promedio de los píxeles (tp_bmp) como los umbrales ya mencionados, determinando así una escala amarilla. Se observa un rol preponderante del promedio de temperaturas de la imagen en el algoritmo, causando que la imagen generada sea altamente sensible a los cambios de temperatura (valores

¹¹La función calcularAzul arroja valor 0 siempre por elección de Termodron 1.

RAW) obtenidos, lo que explica las variaciones en las representaciones.

A partir de lo anterior se concluye que el algoritmo utilizado para transformar los datos de la cámara a BMP debe ser corregido, de forma de lograr un sistema más robusto hacia pequeñas variaciones de temperatura.

Se plantean dos posibles soluciones para esto. En caso de usar la radiometría deshabilitada se sugiere modificar la transformación de RAW a °C que difiere de la presentada por Termodron 1. Se propone utilizar la fórmula presentada en la sección de calibración de la cámara de [2], donde se considera la temperatura interna de la misma (`cam_temp`), solo que en este caso se recomienda realizar una lectura de la temperatura antes de cada guardado y no solo al inicializarla, logrando así que se compense en parte el cambio en la escala por tener la radiometría desactivada. La segunda opción consiste en hacer uso del envío de los valores RAW desde la OnBoard a la Estación de Monitoreo y Control, para realizar la conversión en la segunda y no en la placa Arduino, ya que la Raspberry Pi posee capacidad de cómputo mayor y existen soluciones para la representación como la descrita en [37].

Recomendaciones para el uso de la cámara

Se recomienda la habilitación de la radiometría, ya que con esto se fija la escala a la salida y se logra que fotos tomadas a la misma distancia del objetivo pero en condiciones de temperatura diferentes, puedan ser comparables. La escala fijada es la de los valores RAW, por lo que para obtener la temperatura de cada píxel, la cámara debe ser calibrada como se puede apreciar en [52] y [54] actualizando los valores en la cámara, función que no se encuentra disponible para este modelo[55]. Por esta misma razón es que se recomienda un cambio de cámara térmica (por ejemplo la presentada en [35] que cuenta con radiometría y salida RGB) por una con opciones de radiometría, ya que los nuevos modelos permiten la utilización de modos más precisos de medición como ser las funciones TLinear y spotmeter (devuelve el promedio, el máximo y el mínimo de una zona de interés en Kelvin). Permiten además, compensar el problema del desajuste producido al darse el cambio de entorno desde la fábrica al lugar de aplicación real con parámetros configurables por el usuario, los cuales incluyen la emisividad, la temperatura atmosférica, temperatura de fondo, etc.

Como se recomienda activar la radiometría también se recomienda activar el modo de ganancia automática, ya que el mismo solo puede ser activado si la radiometría también lo está. Por defecto la cámara se encuentra en modo de alta ganancia, que provee mayor responsividad¹² y menor ruido para la operación normal. El modo de baja ganancia provee menor responsividad y métrica de ruido mayor, pero con el beneficio de proveer mayor rango de temperaturas dentro de la escena.

Cabe destacar que, como se mencionó previamente, estas activaciones no repercuten en los resultados de las experiencias realizadas. Se pretende lograr que imágenes capturadas a la misma distancia del objetivo, pero con temperaturas ambiente diferentes, sean comparables. Sin embargo en la primer experiencia el problema radica en la distancia de la cámara al objetivo (ya

¹²Es el cambio en la salida del píxel ante un cambio en la escena observada por el mismo.

que la temperatura ambiente se considera constante) y es en esto donde esta cámara falla, no siendo posible utilizar parámetros de radiometría de corrección (como lo son la emisividad, la temperatura ambiente, etc). Para el caso de la segunda experiencia, se observó que las imágenes RAW presentan variaciones insignificantes que no deberían suponer tal variación en la imagen BMP, por ende el problema radica en el algoritmo de transformación de un formato al otro.

C.1. Descripción de la implementación del software

El desarrollo del software de la computadora a bordo (Arduino DUE) fue realizado mayormente por Termodron 1. Por más detalles en la implementación de cada función, ir a [2]. Las funciones principales desarrolladas en ese momento fueron las siguientes:

- Corrección de coordenadas: Se definen dos funciones, encargadas de convertir coordenadas utm a wgs84 y viceversa.
- Comandos para la cámara Lepton: Se implementa funciones para establecer la comunicación SPI con la cámara Flir Lepton.
- Mensajes Mavlink: En este item se incluyen todas las funciones encargadas de establecer la comunicación serial con la Pixhawk par obtener el estado actual de la misión y parámetros relevantes. Incluye además, el envío de imágenes y logs utilizando el buffer triestado (este código es modificado en este proyecto).
- Manejo de shield sd: Es un conjunto de funciones que establecen la configuración y manejo del shield sd para el almacenamiento de información.
- Búsqueda de foco de calor: Esta es una función que, una vez que la cámara toma la foto, se ejecuta para procesar los datos y hallar el foco de calor en la imagen.
- Comunicación con estación: Contiene todas las funciones relativas al envío de información hacia la base. Estas funciones son diseñadas desde cero en este proyecto debido al cambio de tecnología en la base.
- Lectura de sensores: Función que ejecuta la lectura de los sensores de ultrasonido y según su valor setea flags.
- Toma de foto: Se incluyen las funciones encargadas de sincronizar la cámara, sacar la foto y almacenarla.

- Estados: Conjunto de funciones que manejan el vuelo del dron. Según su estado, se implementa la toma de fotos o la evasión. Estas funciones son cambiadas en este proyecto para implementar un nuevo algoritmo de evasión.

Las funciones previamente mencionadas son ejecutadas mediante un Task Scheduler implementado en la OnBoard, permitiendo ejecutar todas las funciones de forma ordenada cada cierto período de tiempo.

En este proyecto se realizan algunas modificaciones al código de la OnBoard diseñado por Termodron 1, introduciendo funciones y cambiando otras. A continuación se realiza un detalle de las funciones implementadas en este proyecto.

Comunicación con estación

En este caso la comunicación con la estación se implementa desde cero. Se establecen tres tipos de envío de información a la estación desde la OnBoard:

- Envío de logs de vuelo.
- Envío de imágenes (en formato RAW).
- Envío de estado del dron.

El envío de información se maneja a través de la recepción de flags desde la estación. Estas flags, contenidas en un array, indican si la estación requiere del envío de logs, estados o fotos. Para realizar el manejo de esta comunicación con la estación se ejecutan las siguientes funciones:

- **SendSerialtoGCS()**: Esta función ejecuta un switch case donde se llaman a las funciones para el envío de las fotos, logs, estados y la lectura de las flags recibidas desde la estación.
- **ReadSerial()**: Función que lee las flags recibidas desde la estación, y según sus valores (0 o 1) activa las flags correspondientes para el envío de logs, fotos y estados.
- **SendState()**: Función que implementa el envío de estados del dron hacia la base. Los estados del dron son almacenados en un buffer durante la ejecución de la misión y enviados una vez solicitados.
- **SendImage()**: Función que se encarga del envío de la imagen en cinco partes, hacia la estación.
- **SendLog()**: Función que calcula el tamaño del log, y según el resultado, envía la información por partes.

Evasión de obstáculos, toma de fotos y aterrizaje preciso

Como se menciona en la sección 6.2.3, la evasión de obstáculos es realizada en conjunto con la toma de fotos mediante la implementación de la función States. Esta función es implementada desde cero, ya que la diseñada por Termodron 1 contenía otro sistema de evasión mediante waypoints. En cambio, en este caso se controla la velocidad de los motores del dron con la función de Mavlink *mavlinkMgSetPositionTargetLocalNedPack(...)*, la que permite mover al dron según

la dirección deseada. Además de la evasión de obstáculos, States ejecuta la toma de fotos, la detección del punto caliente y el aterrizaje del dron.

La función States es la encargada de relevar el estado del dron, y según el mismo, elige qué acciones realizar. Los cuatro estados principales implementados dentro del States:

1. Esperando misión, **state0(void)**: Función encargada de chequear el estado del dron y cargar una misión en caso de ser recibida.
2. Evasión de obstáculos, **stateDistSensors(void)**: Lee los sensores de ultrasonido y ejecuta el movimiento del dron según la dirección en que se detecta un obstáculo. Para esto, se cambia la misión a modo Guided. Una vez evadido el obstáculo, se sigue con la misión.
3. Toma y análisis de foto, **statePhoto(void)**: Toma una foto, la guarda y llama a la función *SearchBody()* para ejecutar la búsqueda del punto caliente. Guarda además una nueva foto con el píxel correspondiente al punto detectado y ejecuta el algoritmo para detectar la zona de aterrizaje, según la ubicación del punto caliente (este algoritmo, junto a una buena cámara, podría servir para implementar el aterrizaje).
4. Aterrizaje, **stateLanding(void)**: Si el dron aterrizó en la base, lo desarma y vuelve al estado cero a la espera de una nueva misión.

En este manual se describen los conocimientos necesarios para poder utilizar de forma segura y efectiva el producto.

D.1. Descripción del producto

Introducción

Termodron 2 cuenta con dos partes principales. El dron (cuadricóptero autónomo) y la estación de monitoreo y control. Dicho sistema está especialmente diseñado para la detección de puntos calientes mediante la utilización de una cámara infrarroja.

Adicionalmente, la aeronave es capaz de recibir misiones de vuelo pre-seteadas, así como de establecer una comunicación en todo momento con el usuario. Además, es capaz de evadir obstáculos en vuelo y de recargarse de forma autónoma.

Estas características hacen a Termodron 2 un prototipo funcional para detectar fuentes de calor desde el aire de forma rápida y segura.

Características particulares

Control de usuario: El usuario tiene la capacidad de controlar la misión y los parámetros del sistema a través de la web, mediante la plataforma de AWS IoT.

Controlador de vuelo: El controlador de vuelo está equipado con la última versión disponible de ArduPilot, la cual se encuentra en constante desarrollo. Se encarga del manejo y ejecución de misiones y datos del vuelo.

Recarga: El sistema es capaz de recargar la batería del dron de forma automática, permitiendo realizar varias misiones al día sin necesidad de intervención humana.

Evasión de obstáculos: Una vez en vuelo, el dron es capaz de evadir obstáculos presentes en su trayecto.

Información reportada: Las fotos obtenidas por la cámara y los logs de vuelo son enviados al usuario a través de mail.

Diagrama del sistema y estados del dron

A continuación se muestra un esquema de los componentes básicos del dron y la base de recarga, así como las luces indicadoras de estados del dron.

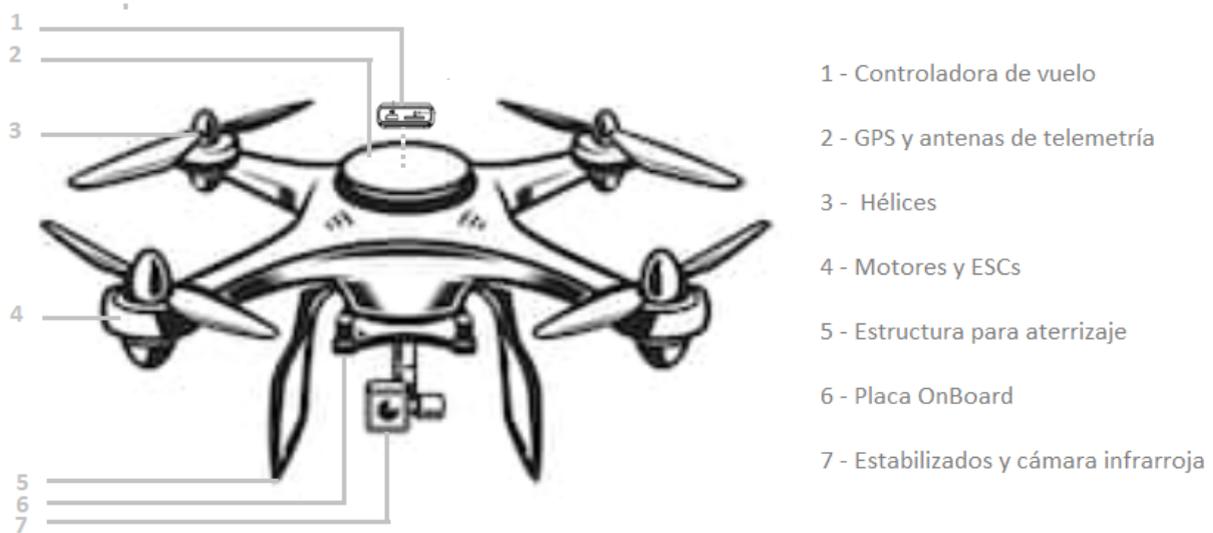


Figura D.1: Diagrama de componentes del dron.

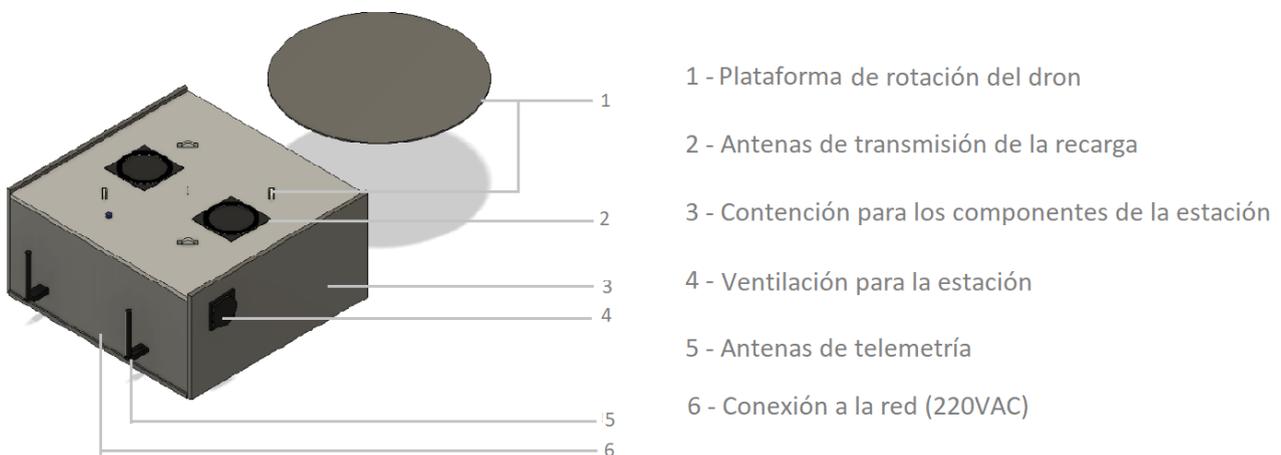


Figura D.2: Diagrama de componentes de la base.

La Pixhawk tiene indicación lumínica de su estado. A continuación en las figuras D.3 y D.4 se tiene un resumen de las mismas.

- 
Parpadeo Rojo, Azul indica inicialización, por favor espere
- 
Doble parpadeo en amarillo: error. El sistema no está en condiciones de armar. Resetear el sistema
- 
Parpadeo en Azul indica que el Dron está desarmado y buscando GPS. Para el vuelo se requiere GPS Lock
- 
Parpadeo en verde indica que el Dron está desarmado, GPS Lock, listo para armar
- 
Verde sólido indica que está armado listo para volar
- 
Parpadeo en amarillo indica activación de Radio Control por estado Failsafe
- 
Parpadeo en amarillo más tono repetitivo rápido indica que detecta baja batería y activa estado Failsafe
- 
Parpadeo en amarillo más tono repetitivo lento indica fallo del GPS

Figura D.3: Leds del controlador de vuelo del dron. Imagen obtenida de [56].

- 
Parpadeo rápido y constante indica que se está realizando un chequeo del sistema. Por favor esperar
- 
Parpadeo intermitente indica que el sistema está pronto. Presionar el botón del switch para activarlo
- 
Sólido indica que está pronto para armar, se puede proceder con el armado del Dron

Figura D.4: Leds del switch del dron. Imagen obtenida de [56].

D.2. Funciones del dron

En esta sección se presenta el sistema de detección de puntos calientes, la comunicación con la base y la evasión de obstáculos.

Detección de focos de calor

Termodron 2 es capaz de detectar focos de calor. Para realizar esta función, el dron está equipado con un cámara térmica FLIR LEPTON y un estabilizador para la misma.

Esta funcionalidad se encuentra activada por defecto, y permite al usuario la recepción vía mail de las fotos del foco de calor obtenidas por el dron, junto a la coordenada GPS de la ubicación del mismo. Las fotos se muestran en formato BMP, con 80x60 píxeles y en escala RGB.

⚠ Si no se desea activar esta funcionalidad, se debe desactivar la característica desde la plataforma de Termodron2 en AWS IoT.

Evasión de obstáculos

Termodron 2 cuenta con un sistema de evasión de obstáculos, compuesto por tres sensores de ultrasonido que detectan la presencia de obstáculos. El cuadricóptero sólo es capaz de evadir obstáculos que se encuentren dentro de un rango de 2 metros (Figura D.5).



Figura D.5: Distancia máxima de evasión.

⚠ La velocidad máxima del dron a la que puede evadir obstáculos es de 1 m/s.

Modos de vuelo

Termodron 2 cuenta con tres modos de vuelo diferentes que pueden ser modificados por el usuario:

Modo misión: Este modo es configurado automáticamente en el dron cuando el usuario desea comenzar una misión. La misión es una lista de coordenadas, que según el orden dado el cuadricóptero traza su recorrido. Las coordenadas geográficas a ser recorridas por el dron son

ingresadas en AWS.

Modo RTL: Este modo retorna el dron a la base interrumpiendo la ejecución de la misión. El usuario puede ordenar esta opción desde AWS.

Modo Land: Este modo aterriza el dron donde se encuentre, en cualquier momento de la misión. El usuario puede ordenar esta opción desde AWS.

El dron dispone de otros modos de vuelo, pero son seteados automáticamente según las acciones a realizar (evasión de obstáculos, despegue, etc).

Registro de vuelo

Los datos de vuelo e imágenes tomadas se registran automáticamente en el almacenamiento interno del dron. Estos datos incluyen la telemetría del vuelo, información del estado del dron, ubicación GPS del punto caliente, nivel de batería, velocidad y otros. Para acceder a estos datos, se debe activar el envío de datos al usuario desde AWS.

Datos más detallados de velocidad de motores y estados del controlador se pueden obtener conectando un cable USB mini desde la PC a la controladora de vuelo.

Corrección de posición

Termodron 2 cuenta con un sistema de corrección de la posición del dron mediante RTK. Este sistema permite lograr una precisión en la posición global del dron de 2 m.

El sistema de corrección de posición se realiza automáticamente mediante la conexión a la estación del cerro (SIRGAS [57]). Esta corrección es válida si la estación de control de Termodron 2 se encuentra a menos de 20 km del cerro. De otra forma, se pierde precisión en la corrección.

D.3. Funciones de la Estación de Monitoreo

A continuación se describen las funciones principales realizadas por la estación de monitoreo.

Conexión a Internet

La estación de monitoreo y control se conecta a internet para el reporte de datos al usuario a través de wifi. Esta conexión se debe configurar accediendo directamente a la RPI. Los pasos a seguir para realizar la configuración de la conexión se describen en D.4.

La conexión a Internet se utiliza para realizar el reporte del estado del dron al servidor web y la corrección diferencial de posición.

Comunicación con el usuario

La comunicación con el usuario es realizada mediante la plataforma web AWS IoT. Para acceder, se deben crear un usuario y contraseña en la plataforma, así una vez brindados los permisos de acceso, el usuario pueda acceder al sistema de Termodron 2.

Dirección de acceso AWS IoT:

<https://console.aws.amazon.com/iot/home?region=us-east-1#/thinghub>.



A partir del acceso a esta plataforma, el usuario puede controlar el sistema. Las acciones configurables desde la web son las siguientes:

- Modo de vuelo.
- Coordenadas de la misión.
- Recepción de logs e imágenes por mail.
- Dirección de correo para recibir los datos.

Así mismo, el usuario puede ver todos los datos reportados por el dron en tiempo real, como ser nivel de batería, posición, modo de vuelo actual, etc. El detalle de la configuración para el inicio del sistema se puede ver en la sección D.4.

Recarga de la batería

Termodron 2 es capaz de recargar su batería de forma autónoma. Una vez que el dron se encuentra en la estación, se detecta el nivel de batería, si se encuentra por debajo del 70 %, comienza la recarga. La misma posee un tiempo máximo de 6 hs, luego del cual se corta

automáticamente. Una vez finalizada la recarga, el dron se encuentra disponible para realizar otra misión.

D.4. Inicio del sistema y ejecución de misión

A continuación se establecen los pasos necesarios para realizar la configuración e inicio del producto y realizar el primer vuelo. Luego de iniciado, el sistema dron-estación posee una autonomía de meses, sin la necesidad de intervención humana.

1 - Armado y configuración de la estación

La estación de control funciona conectada a la red de UTE, conteniendo en su interior una fuente de alimentación AC/DC capaz de proveer la potencia necesaria para todo el sistema. Para encender la estación se deben seguir los siguientes pasos:

1. Desplazar la tapa superior de la estación. Verificar que todos los componentes se encuentren en correcto estado e interconectados correctamente. Como referencia tomar la figura 3.9.
2. Conectar el cable Schuko de la estación a la red (220VAC).
3. Encender la fuente AC/DC (configurada para 24 VDC).
4. Verificar que todos los componentes están energizados.

Como siguiente paso, se debe configurar la RPI para establecer la conexión a internet¹. Para configurar la conexión Wifi de la Raspberry Pi 3, se puede realizar a través de la interfaz gráfica o mediante conexión SSH.

⚠ Se requiere de un ordenador con puerto Ethernet y posibilidad de conectarse a un servidor remoto SSH.

A continuación se explican los pasos para la configuración mediante SSH desde un computador con sistema operativo Ubuntu.

1. Conectar el cable Ethernet al puerto disponible en el ordenador personal.
2. Abrir la consola de comandos
3. Chequear la conexión con la Raspberry con el comando:

```
ping 192.168.0.7
```

4. Conectarse a la raspberry con el comando:

```
ssh pi@192.168.0.7
```

5. Introducir contraseña:

¹En una versión posterior, la conexión será automática por medio de un modem 3G.

TermoDron2

En este momento, ya se encuentra en el sistema operativo de la Raspberry Pi

6. Con el SSID y la contraseña de la red Wifi a la que se conectará, editar el archivo `/etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf`:

```
sudo nano /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf
```

7. En este archivo añadir los datos de la red Wifi:

```
network={\{\
    ssid="nombreWifi"\
    psk="passwordWifi"\
    key_mgmt=WPA-PSK\
\}
```

8. Reiniciar Raspberry Pi

```
sudo reboot
```

Una vez configurada su conexión a internet, la estación se encuentra lista para conectarse al dron y al usuario de forma automática.

⚠ En caso de que, por algún motivo, la memoria de la RPI sea borrada, se debe cargar el código contenido en la carpeta *Control_Station*, disponible en los archivos de código del proyecto.

2 - Preparación del dron y accesorios

Antes de cada vuelo, se debe verificar que todos los componentes de la aeronave se encuentren en correcto estado. Las verificaciones a realizar para establecer el vuelo son las siguientes:

- Verificar integridad de las hélices.
- Verificar nivel de voltaje de batería y estado².
- Revisar nivel de batería del control remoto al encenderlo (10-12 VDC)³.
- Si es el primer vuelo, se debe calibrar el dron. Para esto, seguir los pasos indicados en la sección D.5.
- Conectar la batería al dron.
- Verificar que el dron se encuentra listo para volar, según las luces indicativas (ver sección D.1).

²La batería no debe estar hinchada, y su nivel de voltaje debe estar entre 12 y 12,6 V (medida con un multímetro en sus bornes).

³El control lleva 8 baterías AA.

- Verificar que la computadora a bordo se energiza (prende luz verde).
- (opcional) Encender el control remoto, mover el thottle abajo a la izquierda, y verificar que el dron arma y mueve las hélices⁴. Luego hacer un disarm (throttle abajo a la derecha).

⚠ En caso de que, por algún motivo la memoria de la OnBoard sea borrada, se debe cargar el código contenido en la carpeta *on_board_TD2*, disponible en los archivos de código del proyecto.

⚠ Tanto el dron como la estación se deben colocar en espacios abiertos. El dron no vuela en espacios cerrados o donde no haya señal GPS.

3 - Conexión a AWS

El ingreso a AWS y la creación de usuario se hacen por medio de la web <https://console.aws.amazon.com/iot/home?region=us-east-1#/thinghub>. Los pasos a seguir en la web para ingresar a Termodron 2 son los siguientes:

1. Ingresar correo electrónico y contraseña.
2. Una vez ingresado, aparece la lista de objetos a las que el usuario puede acceder. Ingresar a TermoDron2.
3. Dentro del objeto TermoDron2, el reporte de datos se puede acceder a través de la pestaña “Sombra”.

Una vez que el usuario ingresó a este punto es capaz de obtener la información reportada del dron y modificar los parámetros de misión y cambios de modo.

4 - Configuración e inicio de la misión

Para iniciar una misión de Termodron 2, se deben establecer las preferencias de vuelo y de misión requeridas por el usuario. A continuación se describen las configuraciones disponibles y cómo se setean cada una.

Estos son los parámetros configurables del dron:

```
"desired": {
  "DSR-home_location": [],
  "DSR-Mission": {
    "points": {
      "1": {
        "lat": -35.361322,
        "lon": 149.165082,
        "alt": 22
      },
      "2": {
```

⁴El mismo mueve las hélices a la velocidad más baja, sin despegar.

```

        "lat": -35.362351,
        "lon": 149.162832,
        "alt": 22
    },
    "3": {
        "lat": -35.363622,
        "lon": 149.163881,
        "alt": 13
    },
    "4": {
        "lat": -35.363752,
        "lon": 149.165301,
        "alt": 4
    }
},
"mode": "0"
},
"DSR-Land": "0",
"DSR-RTL": "",
"DSR-Email": {
    "Send": "",
    "WaitTime": "",
    "List": [
        ""
    ]
},
"DSR-Foto": "0",
"DSR-FotoSD": "0",
"DSR-Log": "0"
},

```

- **DSR-Mission:** En este parámetro se ingresan las coordenadas en formato (latitud, longitud, altura) en el orden que se desea realizar la trayectoria de vuelo. En el parámetro “mode” se ingresa 1 en caso de que se desee repetir la misión.
- **DSR-Land:** Cambio modo vuelo a “LAND”. Variable booleana.
- **DSR-RTL:** Cambio modo vuelo a “ReturnToLaunch”. Variable booleana.
- **DSR-Email:** Configuración de cuentas de correo electrónico para envío de información de vuelo.
 - Send: Habilitación de envío
 - WaitTime: Tiempo de espera entre mensajes
 - List: Lista de correos electrónicos a enviar.
- **DSR-Foto:** Habilitación de recepción de fotos durante ejecución de misión.

- **DSR-FotoSD:** Habilitación de recepción de historial de fotos de vuelo.
- **DSR-Log:** Habilitación de recepción de log de vuelo.

Para setear estas variables se debe editar “Estado de sombra” en la plataforma de AWS IoT. En la figura D.6 se puede ver como guardar los cambios.

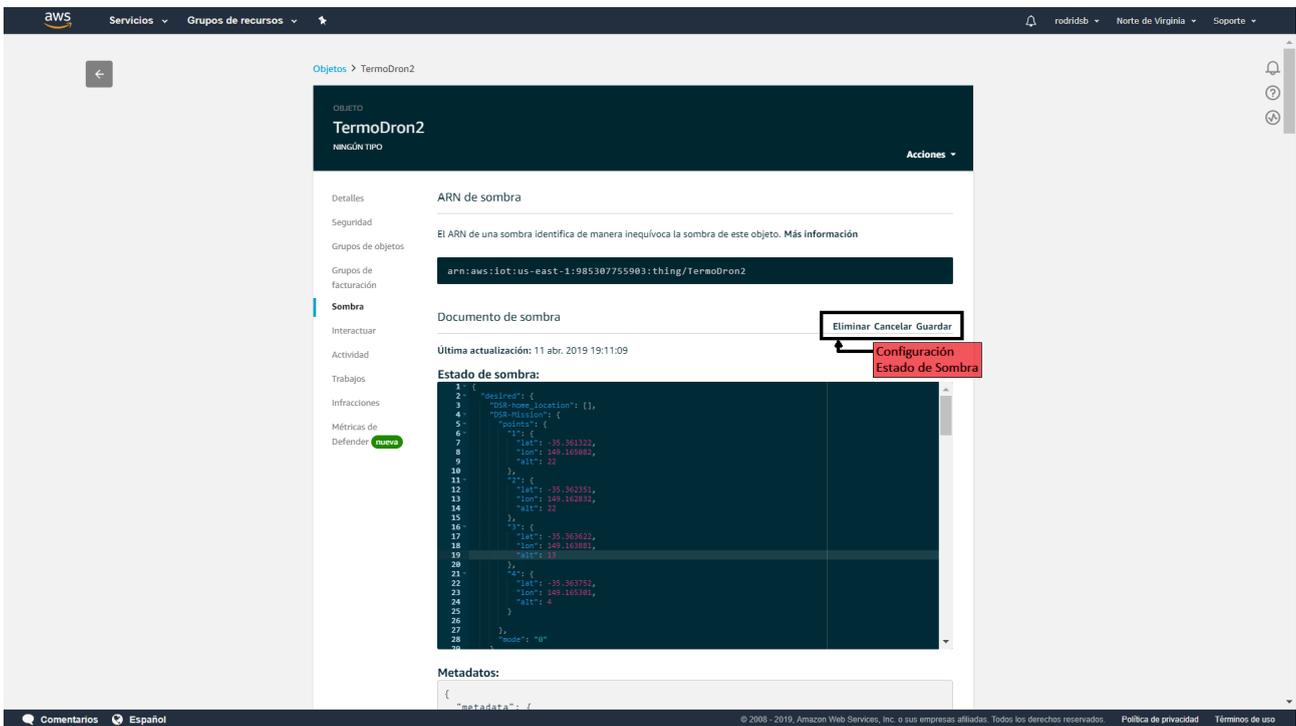


Figura D.6: Edición de Estado de sombra en plataforma AWS IoT

Una vez configurados los cambios que el usuario desea, se debe ver reflejado este cambio de estado en las variables “reported” con el mismo nombre.

D.5. Calibración del dron

Antes de realizar el primer vuelo, el dron debe ser calibrado para ajustar las referencias de todos los sensores contenidos en la controladora de vuelo. Se recomienda además, que la calibración se realice en las siguientes situaciones:

- Cambio de ubicación/clima/entorno de vuelo.
- Períodos mayores a una semana sin volar el dron.
- Cambio en componentes conectados a la controladora de vuelo.

Para realizar la calibración, se debe descargar e instalar⁵ el software ⁶ (disponible para Windows y Ubuntu). Los materiales a utilizar para la calibración son:

- Dron.
- PC con QGroundControl (QGC).
- Cable USB.
- Sistema de estabilización (opcional).
- Batería.
- Control remoto.

⚠ Durante la calibración y en espacios cerrados, el software QGC puede mostrar mensajes de warning. Estos mensajes corresponden a lecturas incorrectas de los sensores, y son corregidos automáticamente por el SW cuando el dron se encuentra al aire libre.

Los tres grandes componentes del dron a calibrar son:

- Sensores.
- Radio (opcional).
- ESCs.

Sensores

Los sensores a calibrar son tanto internos a la controladora como externos a la misma y son los siguientes:

- Gyroscope
- Compass

⁵Guía de instalación: https://docs.qgroundcontrol.com/en/getting_started/download_and_install.html

⁶Software gratuito disponible en: <http://www.http://qgroundcontrol.com/>

- Accelerometer
- Level Horizon
- Pressure

Para la calibración de los sensores, se debe desacoplar la parte superior del dron (que contiene a la controladora, GPS, antenas y radio). Para esto, se deben remover las 16 tuercas que sujetan la placa de la figura D.7 al resto del frame del dron, y desconectar los cables ubicados en los pines Power y Telemetry 2 de la controladora de vuelo.

Como paso siguiente, se debe conectar la controladora de vuelo a la PC (funcionando con QGC) mediante un cable USB.

Aunque la calibración de los sensores se puede realizar a mano, se recomienda el uso de un sistema de estabilización de centro de masa como se muestra en la figura D.7.

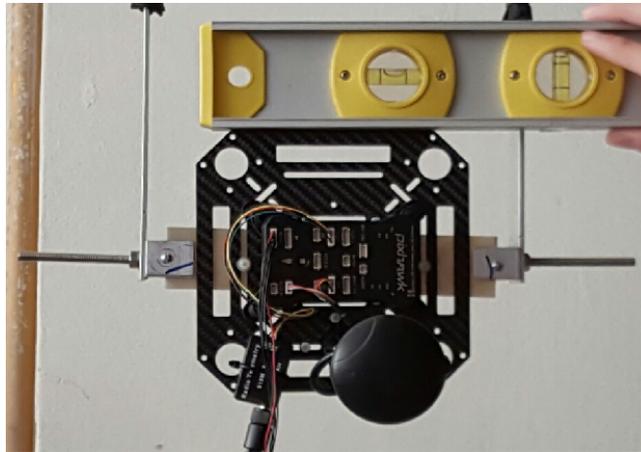


Figura D.7: Estabilizador recomendado para la calibración. Imagen obtenida de [2].

Finalmente, utilizando QGC, se deben seguir los pasos que se recomiendan para calibrar cada sensor, como se aprecia en la figura D.8.

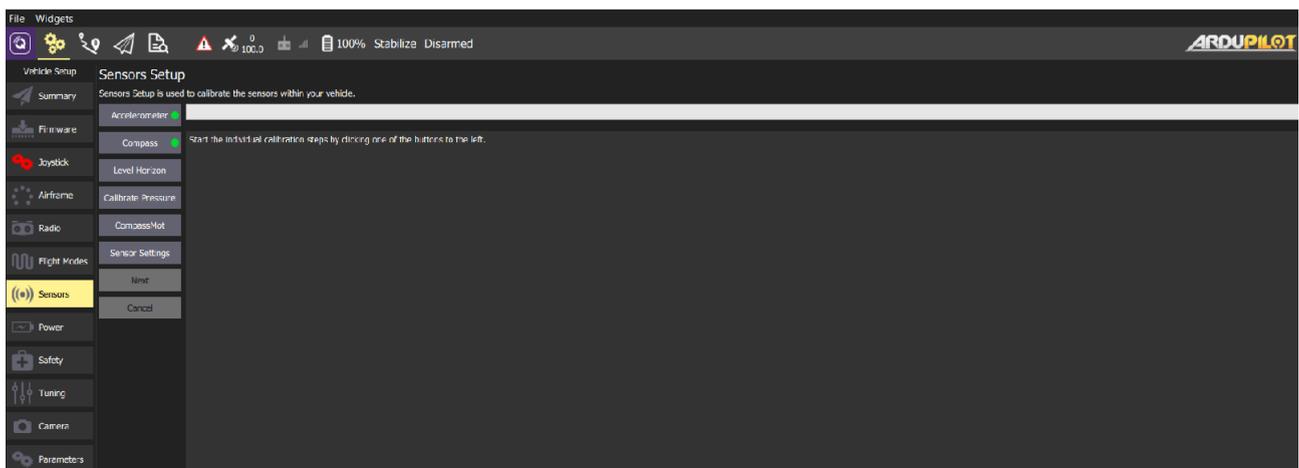


Figura D.8: Imagen del software utilizado para calibrar.

Se recomienda además realizar la calibración de "Level Horizonz " Pressure in situ antes de cada sesión de vuelo.

Radio (opcional)

La calibración de la radio se debe realizar para asegurar una buena conexión y control del dron mediante el control remoto.

Para realizar la calibración, conectar el controlador de vuelo a la PC (mediante un cable USB), abrir QGC y encender el control remoto. Luego, dirigirse a la sección radio (ver figura D.9) y seguir los pasos recomendados en QGC. Para detalles más específicos sobre la calibración, ir a <https://docs.px4.io/en/config/radio.html>.

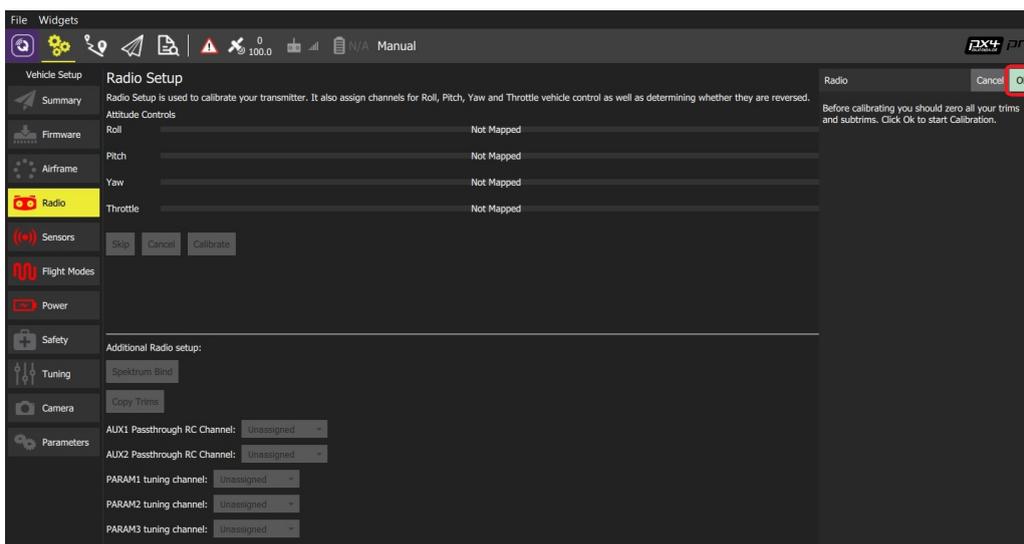


Figura D.9: Imagen del software utilizado para calibrar la radio.

ESCs

La calibración de los ESCs se debe realizar sólo en caso de cambios de motor o controladores. Para realizar la calibración, se debe ensamblar el dron por completo. Esto implica la conexión de la batería y los motores a la controladora.

- ⚠ No se deben colocar las hélices durante este proceso.
- ⚠ El cable USB no debe estar conectado a la controladora de vuelo.

La calibración se realiza utilizando el dron y el control remoto. Una vez que se dispone de los componentes, se deben seguir los siguientes pasos en orden:

1. Con la batería del dron desconectada, encender en control y poner el throttle al máximo.
2. Conectar la batería al dron. El mismo prenderá las luces rojas, verde y azul del controlador, indicando que se encuentra listo para calibrar la próxima vez que se encienda.
3. Con el throttle del control todavía en alto, desconectar y conectar la batería del dron.

4. Esperar a que el dron realice 2 pitidos consecutivos.
5. Inmediatamente después, ubicar el throttle al mínimo y esperar por 3 pitidos consecutivos.
6. Una vez escuchados los últimos 3 pitidos, la calibración está completa.
7. Si se desea, para verificar el funcionamiento de los ESCs, mover el throttle hacia arriba y verificar que los motores giran.

⚠ Adicionalmente, en caso de cambio de motores, se debe verificar el giro de las hélices de cada motor según la figura D.10 y que las mismas se ajusten bien luego de colocadas.



Figura D.10: Sentido del giro de las hélices del dron⁷.

⚠ Finalmente, y como precaución, se recomienda descargar los parámetros del dron luego de la calibración y ANTES de grabar una nueva versión de Firmware al Pixhawk.

⁷CW: Clockwise (sentido horario), CCW: Counterclockwise (sentido antihorario).

D.6. Especificaciones del producto

Dron	
Peso	2469 g
Dimensiones	38 x 38 x 40 cm
Velocidad de ascenso	2.5 m/s
Velocidad de descenso	1.5 m/s
Velocidad máxima horizontal	5 m/s
Altitud de vuelo máxima	100 m
Tiempo de vuelo máximo	10 min (sin viento)
GPS	
GNSS	DGNSS-RTK
Precisión de vuelo con GPS	200 cm
Evasión de obstáculos	
Tecnología	Sensores de ultrasonido. Detección: Abajo, Izquierda, Derecha y al Frente.
Rango de detección de obstáculos	2 m
Velocidad máxima para evasión	1 m/s
Telemetría	
Frecuencia de comunicación (canal OnBoard)	433 MHz
Distancia máx. (canal OnBoard)	2 km
Frecuencia de comunicación (canal de controladora)	915 MHz
Distancia máx. (canal de controladora)	1.5 km
Cámara	
Tipo de cámara	FLIR LEPTON
Tamaño de imagen	80 x 60 píxeles
Almacenamiento disponible	2 GB
Tarjetas SD admitidas	FAT 32 (32 GB)
Formato de imagen	BMP
Gimbal	Storm 32 v 0.9, 3 ejes
Control remoto (opcional)	
Marca	Turnigy 9X
Frecuencia de funcionamiento	2.4 GHz
Distancia máxima (sin obst.)	Over 1000m
Batería	Baterías 8 AA
Batería	
Tipo	LiPo 3s
Capacidad	5 Ah, 50 C de descarga
Voltaje	11,1 V nominal
Tensión máxima	12,4 V

Peso	400 g
Temperatura de func.	0-50 °C
Recarga	
Tiempo de recarga máx.	6 hs
Voltaje mínimo sin recargar	12 V
Potencia disponible máx.	26 W
Distancia de recarga	0.5 cm

Estación de Monitoreo y Control	
Dimensiones	44,5 x 48 x 22 cm
Material	Madera
Alimentación	220 VAC
Conexión a internet	Modem 3G o Red Wifi
Consumo máximo	60 W

- [1] 2019. [Online]. Available: <https://www.masscience.com/2015/08/21/expodronica-la-primera-feria-de-drones-de-uso-civil-24-25-septiembre-zaragoza/>
- [2] Damián Vallejo, Agustin Barriola, Ignacio Reyes, *TERMODRON 1 - Dron de vuelo autónomo y reconocimiento por termografía*. UDELAR, 2017.
- [3] Fida Newaj, *Wireless charging system for autonomous drones*, 2018.
- [4] 2019. [Online]. Available: <https://www.orolia.com/products-services/gnss-simulation/rtk-dgnss-virtual-reference-station-option>
- [5] “Motor emax 2822 datasheet,” 2016. [Online]. Available: <http://www.merqc.com/files/Datasheet/emax.pdf>
- [6] 2019. [Online]. Available: <https://www.skysense.co/>
- [7] 2019. [Online]. Available: <http://www.edronic.com/>
- [8] 2019. [Online]. Available: <https://www.wibotic.com/>
- [9] Junaid, A. B. (1), Konoiko, A. (1), Zweiri, Y. (1,2), Sahinkaya, M. N. (1), Seneviratne, L. (2), *Autonomous wireless self-charging for multi-rotor unmanned aerial vehicles*. Energies, 2017.
- [10] Mostafa, Tarek M.; Muharam, Aam; Hattori, Reiji, *Wireless battery charging system for drones via capacitive power transfer*. IEEE, 2017.
- [11] Deepak, Rosario, *Design of Contactless Capacitive Power Transfer Systems for Battery Charging Applications*. UOIT, 2016.
- [12] Richard Coesoij, Jelmer van der Hoeven, *A Wireless Charging Solution for the Zebro*. Technische Universiteit Delft.
- [13] Campi, T.; Cruciani, S.; Feliziani, M.; Maradei, F, *High efficiency and lightweight wireless charging system for drone batteries*. AEIT, 2017.

- [14] Muhammad Taha Ali, Ali Anwar, Umair Tayyab, Yasir Iqbal, Tauseef Tauqeer and Usman Nasir, *Design of high efficiency wireless power transmission system at low resonant frequency*. IEEE, 2014.
- [15] Michael Score, *Ceramic or electrolytic output capacitors in DC/DC converters*. Analog Applications Journal.
- [16] 2018. [Online]. Available: https://www.we-online.com/web/en/index.php/download/media/07_electronic_components/download_center_1/application_notes_berichte/kabellose_energieuebertragung/Wireless_Energy_Transmission-Coils_as_Key_Components_EN.pdf
- [17] 2018. [Online]. Available: http://www.coonerwire.com/cooner_catalog_rev9-8.pdf
- [18] 2018. [Online]. Available: <https://www.mouser.com/pdfDocs/Wurth-Going-Wireless-with-Magnetic-Shielding.pdf>
- [19] “U-blox m8n datasheet,” 2015. [Online]. Available: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8_DataSheet_\(UBX-13003366\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8_DataSheet_(UBX-13003366).pdf)
- [20] 2018. [Online]. Available: <https://www.mouser.com/ds/2/813/HCSR04-1022824.pdf>
- [21] “Flir lepton datasheet,” 2014. [Online]. Available: <http://www.flir.com/uploadedFiles/OEM/Products/LWIR-Cameras/Lepton/Lepton-3-Engineering-Datasheet.pdf>
- [22] “Shield sd datasheet,” 2012. [Online]. Available: http://www.supertalent.com/datasheets/5_112.pdf
- [23] 2019. [Online]. Available: <https://opencircuit.nl/ProductInfo/1000064/LJ12A3.pdf>
- [24] 2019. [Online]. Available: <https://naylorlampmechatronics.com/sensores-proximidad/136-sensor-de-proximidad-inductivo-lj12a3-4-zbx-npn.html>
- [25] 2019. [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/324/C140-A+datasheet.jpg>
- [26] 2019. [Online]. Available: https://www.pololu.com/file/0J450/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf
- [27] 2015. [Online]. Available: <https://github.com/jcmb/NTRIP/blob/master/NTRIP%20Client/NtripClient.py>
- [28] 2018. [Online]. Available: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-configuring-a-telemetry-radio-using-mission-planner.html>
- [29] 2019. [Online]. Available: http://www.amstechnologies.com/fileadmin/amsmedia/downloads/2292_markIR.pdf
- [30] 2019. [Online]. Available: <https://irlock.com/collections/ir-markers/products/markone-beacon-v2-0?variant=45031002691>

- [31] J.A. GARCÍA-PULIDO, G. PAJARES, S. DORMIDO, J.M. DE LA CRUZ, *Recognition of a landing platform for unmanned aerial vehicles by using computer vision-based techniques*. Elsevier Ltd., 2017.
- [32] Vidya SUDEVAN, Amit SHUKLA, Hamad KARKI, *Vision based Autonomous Landing of an Unmanned Aerial Vehicle on a Stationary Target*. ICCAS, 2017.
- [33] Bruno S. J. COSTA, Vitor R. GREATI, Vinicius C. T. RIBEIRO, Celso S. JUNIOR, Ivanilson F. V. JUNIOR, *A Visual Protocol for Autonomous Landing of Unmanned Aerial Vehicles Based on Fuzzy Matching and Evolving Clustering*. IEEE, 2015.
- [34] Tomas BACA, Petr STEPAN, Martin SASKA, *Autonomous Landing On A Moving Car With Unmanned Aerial Vehicle*.
- [35] 2019. [Online]. Available: <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/lepton-engineering-datasheet---with-radiometry.pdf>
- [36] RIBEIRO, Ricardo Ferreira, *Face Detection on Infrared Thermal Image*. Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones e Informática, Universidade de Aveiro, 2017.
- [37] 2019. [Online]. Available: <https://me.knnect.com/blog/visualizing-flir-lepton-thermal-data-for-statistical-analysis/>
- [38] “Pixhawk datasheet,” 2017. [Online]. Available: <https://3dr.com/wp-content/uploads/2017/03/pixhawk-manual-rev7-1.pdf>
- [39] “Radio telemetry 3dr datasheet,” 2013. [Online]. Available: <https://3dr.com/wp-content/uploads/2013/10/3DR-Radio-V2-doc1.pdf>
- [40] Mohinder S. Grewal and Angus P. Andrews, *Kalman Filtering: Theory and Practice using MATLAB, Second Edition*. Wiley-Interscience, 2001.
- [41] Henry J. ZHANG, *Basic Concepts of Linear Regulator and Switching Mode Power Supplies*. Linear Technology, 2013.
- [42] “Shield 3g itead datasheet,” 2014. [Online]. Available: https://www.openhacks.com/uploads/productos/itead_3g_shield_-_itead_wiki.pdf
- [43] “At command set,” 2010. [Online]. Available: http://ec-mobile.ru/user_files/File/SIMCom/simcom_sim5215sim5216_atc_en_v1.05.pdf
- [44] L. MEIER, “Mavlink web page,” 2009. [Online]. Available: <https://mavlink.io/en/>
- [45] OASIS, “Mqtt: Message queuing telemetry transport,” 1999. [Online]. Available: <http://mqtt.org/>
- [46] P. S. Foundation, “The python standard library,” 2001. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/library/>
- [47] 2019. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/RTK_\(navegaci%C3%B3n\)](https://es.wikipedia.org/wiki/RTK_(navegaci%C3%B3n))

- [48] 2019. [Online]. Available: https://files.groupgets.com/lepton/documents/Lepton_Datasheet_PUBLIC%20v125.pdf
- [49] 2019. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Stefan-Boltzmann
- [50] 2019. [Online]. Available: <http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>
- [51] 2019. [Online]. Available: https://www.construmatica.com/construpedia/T%C3%A9cnicas_de_medic%C3%B3n_termogr%C3%A1fica._Midiendo_la_emisividad
- [52] Rubén USAMENTIAGA, Pablo VENEGAS, Jon Guerdiaga, Laura VEGA, Julio MOLLEDA, Francisco G. BULNES, *Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing*. Sensors, 2014.
- [53] 2019. [Online]. Available: https://www.optris.com/webinar-on-non-contact-temperature-measurement-of-metal?file=tl_files/pdf/Downloads/Brochures%20US/optris-basic-brochure.pdf
- [54] 2019. [Online]. Available: https://www.optris.es/descargas-cameras-infrarrojas?file=tl_files/pdf/Downloads/Spanish/principios-fundamentales.pdf
- [55] 2019. [Online]. Available: <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-lepton-software-interface-description-document.pdf>
- [56] 2017. [Online]. Available: <http://www.manualsdir.com/manuals/576767/3d-robotics-pixhawk-autopilot.html?page=10>
- [57] 2019. [Online]. Available: <http://www.sgm.gub.uy/geoportal/estaciones/>