

Hardware y comunicaciones de una unidad autónoma voladora de tipo multicóptero

Francisco Domínguez

*Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva
Universidad Tecnológica Nacional
Buenos Aires, Argentina
fdominguez@est.frba.utn.edu.ar*

Leonardo Yañez

*Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva
Universidad Tecnológica Nacional
Buenos Aires, Argentina
leonardo_yanez_87@yahoo.com.ar*

Lucas Liaño

*Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva
Universidad Tecnológica Nacional
Buenos Aires, Argentina
lucas.liano2000@gmail.com*

Pablo Maiolo

*Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva
Universidad Tecnológica Nacional
Buenos Aires, Argentina
pablo.maiolo@yahoo.com.ar*

Diego Durante

*Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva
Universidad Tecnológica Nacional
Buenos Aires, Argentina
diegopdurante@gmail.com*

Sebastián Verrastro

*Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva
Universidad Tecnológica Nacional
Buenos Aires, Argentina
sverastro@frba.utn.edu.ar*

Resumen—El presente trabajo detalla el desarrollo de un sistema UAV conformado por un dron del tipo cuadricóptero, la estación terrena controladora del mismo y el sistema de comunicaciones utilizado entre ambos. Dicho sistema se encuentra diseñado para que el usuario pueda personalizarlo en base a las necesidades del mismo.

Keywords—dron, cuadricóptero, GCS, comunicaciones, UAV

I. INTRODUCCIÓN

Técnicamente, un sistema VANT (vehículo aéreo no tripulado), o de su sigla en inglés UAV (unmanned aerial vehicle), comprende una cantidad de elementos, o subsistemas, de los cuales el vehículo aéreo es uno más. La estructura funcional de un sistema típico se muestra en la Figura 1, incluyendo la aeronave, sus cargas útiles, la(s) estación(es) de control (y, a menudo, otras estaciones remotas), la plataforma de lanzamiento y recuperación de aeronaves, sistemas de comunicación, subsistemas de transporte, entre otros. Hay otras facetas de integración dentro del sistema más global, como la autorización requerida para operar dentro del espacio aéreo controlado, que no se muestran en dicha Figura [1].

Desde un punto de vista funcional, ningún subsistema es más importante que otro, aunque el vehículo aéreo en sí, tienen un mayor impacto sobre el diseño. En los primeros días de desarrollo del sistema UAV, por ejemplo, algunas aeronaves no tripuladas se diseñaron con una consideración

inadecuada de cómo se montaría la carga útil, de cómo se lanza o recupera, cómo se realizan las comunicaciones o de cómo es el mantenimiento y transporte. Los intentos posteriores de construir un sistema operativo a su alrededor estaban condenados al fracaso o daban como resultado compromisos o costos inaceptables.

En el presente trabajo se hará foco en el vehículo aéreo, la estación terrena y las distintas comunicaciones.

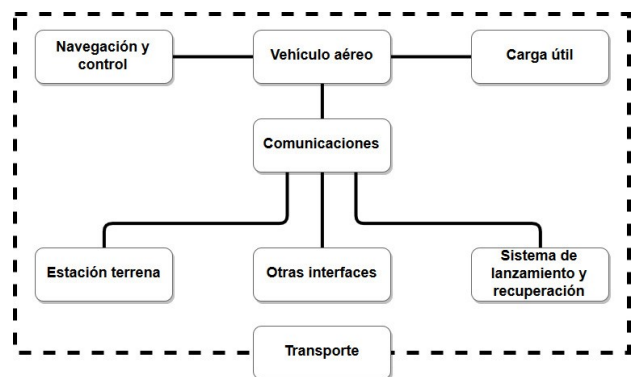


Figura 1. Estructura funcional de un sistema UAV

II. COMPONENTES PRINCIPALES

En esta sección se detallan los componentes principales de un sistema autopilot [2], el cual incluye tanto software

como hardware capaz de reemplazar total o parcialmente la intervención humana en el guiado del vehículo aéreo mientras se encuentra en vuelo [3]. El funcionamiento del mismo está determinado por la misión que tenga que realizar la unidad [1].

II-A. Controlador de vuelo

El controlador de vuelo es la plataforma de hardware principal encargada del procesamiento y operaciones de un UAV tales como el control de motores, la integración de sensores internos y externos, comunicación y la implementación de la ley de control [4]. Su desempeño depende principalmente del sistema embebido utilizado.

Los UAVs utilizan sensores para detectar los cambios en los alrededores y poder actuar en base a los datos proporcionados por los mismos. La controladora de vuelo cuenta generalmente con un módulo denominado Unidad de Medición Inercial (derivado del inglés, Inertial Measurement Unit o su abreviación IMU) el cual es el componente principal de los sistemas de navegación inercial y maniobra de un UAV. Utiliza una combinación de acelerómetros y giróscopos para estimar con certeza el cabeceo (del inglés, pitch) y el alabeo (roll). Para una mejor estimación de la guiñada (yaw) el mismo utiliza magnetómetros.

II-B. Sistema de propulsión

El sistema de propulsión en UAVs multirrotores se compone generalmente de motores sin escobillas (brushless) de corriente continua (BLDC) encargados de mover las hélices. Estos motores son comandados por los controladores electrónicos de velocidad (ESC, acrónimo del inglés para Electronic Speed Controller). Para unidades de bajo peso suelen utilizarse motores con escobillas para reducir costos. La selección de cada componente es crucial para lograr un sistema de propulsión acorde con la aplicación [5].

II-C. Sensores externos

Como complemento de la IMU incluida en la controladora de vuelo, los vehículos aéreos suelen contar con:

- Barómetro: Utilizado para medir la presión atmosférica, lo que permite estimar la altitud del dron respecto del suelo
- GNSS (Global Navigation Satellite System): Permite medir la ubicación del vehículo utilizando sistemas satelitales como el Global Positioning System (GPS), el cual tiene una exactitud de entre 2 y 4 metros. Si bien el sistema GNSS tiene un mayor tiempo de respuesta que los sensores locales, el mismo da una posición absoluta, posibilitando la combinación entre la IMU para mejorar la exactitud en el posicionamiento del dron [4].
- Ultrasonido: Sistemas de este tipo tienen una mayor precisión en rango corto respecto de los otros métodos empleados, su alcance está limitado típicamente a menos de 2 metros, además de poseer una distancia mínima medible. La principal misión de este componente es la de detectar obstáculos a corta distancia para una medición

más precisa de la altura del dron respecto de la superficie de aterrizaje.

II-D. Sistemas de comunicación

La función del módulo de comunicaciones es administrar un canal de tecnologías múltiples programable, que provea compatibilidad con las tecnologías más utilizadas comercialmente. Este módulo se vincula con la interfaz de usuario mediante protocolo TCP y UDP (wireless), disponible en dispositivos de consumo masivo.

Entre los canales con que debe contar este módulo distinguimos canales para órdenes de control, de alta velocidad y bajo tiempo de respuesta (latencia) y por otro lado canales de transmisión de vídeo, con alto tráfico de datos fácilmente accesibles por el operador. Hemos de evaluar rasgos como alcance, velocidad y confiabilidad a la hora de elegir las tecnologías que constituirán ambos grupos. Asimismo debe existir una plataforma de comunicaciones que pueda controlar el vehículo desde un dispositivo computacional y al mismo tiempo sea de manejo cómodo y amigable para el operador. En resumen, la comunicación con la unidad aérea se compone de los siguientes elementos:

- Ground Control Station (GCS): es una aplicación de software que corre sobre una unidad computacional, ya sea una PC, tablet, entre otras [6]. Es utilizada para comunicarse con el dron inalámbricamente y monitorear su posición, establecer puntos de referencia o ejecutar nuevos comandos.
- Módulo de comunicaciones: Plataforma de hardware que interpreta los comandos y órdenes de la aplicación anterior para transmitirlos al dron por medio de los puertos apropiados, ha de ser programable y poseer la suficiente inteligencia para tomar decisiones críticas. Se vincula con la interfaz de usuario mediante protocolo TCP y UDP (wireless).
- Radio Control (R/C) Transmitter: utilizado para el control del movimiento y orientación del dron compatibilizándolo con los dispositivos disponibles para tal fin. Se emplea el control digital por su mayor versatilidad, la comunicación entre el Radio Control y el dron será directa.

III. ESTACIÓN DE TIERRA

El desarrollo de una interfaz gráfica para la estación de tierra es uno de los aspectos importantes de la plataforma propuesta, y las decisiones de diseño repercuten directamente sobre la facilidad de manejo del vehículo. Se consultaron distintas fuentes para determinar las mejores prácticas a la hora de diseñar una interfaz y se investigó la posibilidad de adaptar un software previamente desarrollado.

III-A. Estado del arte en interfaces de usuario para estaciones de tierra

Un equipo para controlar UAS (Unmanned Aerial System) pequeños incluye los siguientes roles: piloto, especialista en la misión y director de vuelo [7]. Estos roles se ajustan

a las misiones de los micro UAVs y UAVs pequeños. Los primeros tienen dimensiones en torno al metro de longitud y están disponibles comercialmente para aplicaciones civiles. El director de vuelo es el encargado de la seguridad del UAV y del equipo en general. El piloto se encarga de operar al UAV dentro de la línea de visión. Por último, el especialista en la misión se encarga de recolectar datos de reconocimiento, por ejemplo, configurar la cámara y analizar el video transmitido por el vehículo.

Dentro de las soluciones comerciales disponibles actualmente, se destaca que las interfaces gráficas utilizadas no soportan de manera independiente la funcionalidad del especialista de misión, ya que comparten la interfaz con el piloto. Sin embargo, una interfaz dedicada a ese rol permitiría realizar tareas vinculadas con la adquisición y manipulación de datos [7].

Existen misiones en las que se requiere que un solo operador esté a cargo de múltiples UAV. En [8] se han realizado simulaciones de estaciones de tierra para el control de múltiples vehículos, las cuales incluyen dos tipos de interfaces de administración: vehículo/misión y carga útil (por ejemplo, sensores).

En el manejo de misión es necesario vincular la información perteneciente a un mismo dron pero distribuida en múltiples ventanas, por ende cuando se manejen múltiples UAVs es recomendable asociar un color para cada vehículo [8].

III-B. Puertos de comunicación

Relevando el estado del arte de la tecnología y varios trabajos relacionados, se ha realizado una recopilación de todas las posibles tecnologías a emplear en la unidad autónoma voladora a fin de seleccionar las más aptas teniendo en cuenta que la diversidad de estas está limitada por la capacidad del hardware. La representación de las prestaciones de las distintas tecnologías en función de su velocidad y su alcance se muestra en la Figura 2.

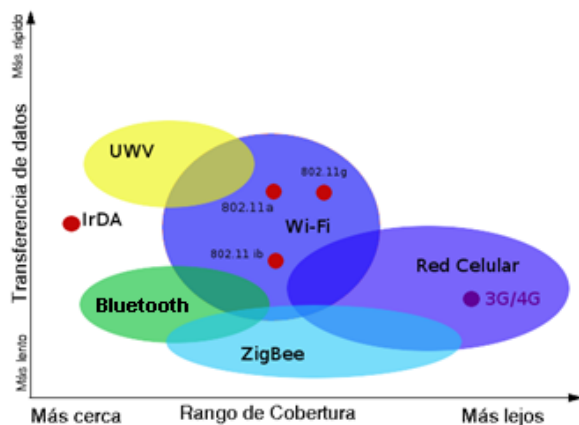


Figura 2. Comparativa de tecnologías de comunicaciones

En la Fig. 2 se puede ver que la tecnología Bluetooth, no resulta apta para la aplicación propuesta debido a su baja velocidad de transferencia (al momento de elegir las

tecnologías la versión 4.0 era la más reciente, ofreciendo una velocidad de hasta 32 Mbps), la necesidad de línea de visión directa entre terminales para efectuar el enlace y la necesidad de sincronización entre estos. En cuanto al alcance, se requerirán transmisores clase 1 para alcanzar los 100 metros y la implementación de un sistema para optimizar la cantidad de transacciones optimizando el consumo de energía.

También se descarta la tecnología de puerto USB inalámbrico que goza de la misma velocidad que los buses USB convencionales pero el alcance es también muy limitado.

El protocolo IEEE802.11 presenta como deficiencia su alcance limitado, y alta latencia convirtiéndolo en inviable para la transmisión de señales críticas para el funcionamiento del dron. Sin embargo los dispositivos de consumo masivo suelen contar con conectividad WiFi por lo que será el medio elegido para comunicar este transceptor con la interfaz de usuario, asimismo es la solución elegida para la transmisión de streaming de vídeo que requiere alta tasa de transferencia.

La transmisión de vídeo tendrá así, un canal IEEE802.11 exclusivo. La limitación de alcance que caracteriza a este protocolo se suple con un canal de datos móviles.

Por lo anteriormente mencionado se procede a elegir otro canal para la transmisión de aquella comunicación crítica para el correcto funcionamiento del dron. Ha de ser una comunicación de bajo tráfico pero también de respuesta rápida, alta confiabilidad, también debe llenar el alcance requerido y poseer baja tasa de error. En la infografía vemos en buena opción al protocolo ZigBee, el cual cuenta con un largo alcance, en contrapartida con la baja velocidad. El riesgo es que la latencia no está asegurada, pero si se lo implementa con tráfico bajo es un protocolo apto para esta aplicación. En cuanto al canal de radio-control, se trata de una comunicación que no será afectada por el transceptor de tecnologías múltiples al tratarse de un enlace directo entre el dron y el usuario.

IV. PLATAFORMA PROPUESTA

En la actualidad la mayoría de las computadoras de vuelo cuentan con sensores redundantes a fin de mejorar la confiabilidad del sistema, pero no todas se encuentran preparadas para incluir unidades de procesamiento adicionales y en ciertos casos placas de desarrollo propias. Esta versatilidad adicional permitiría utilizar la misma plataforma para aplicaciones de bajo rendimiento como para otras que requieran alta capacidad de procesamiento, con tan solo el agregado de un módulo. Por este motivo en la sección siguiente se analiza un hardware para las funciones básicas de mantenimiento en vuelo, que permita el agregado de módulos para la realización de tareas más complejas.

IV-A. Requisitos mínimos de Hardware

En esta sección se plantea el hardware mínimo e indispensable para que el Vehículo Aéreo no Tripulado pueda estar en vuelo, de forma estable y compensando perturbaciones externas. De acuerdo al relevamiento ya mencionado sobre las plataformas de hardware, para que la plataforma sea versátil y escalable tanto en costos como en las funciones a desarrollar,

es necesario que la misma cumpla con ciertas características mínimas detectadas que se listan a continuación:

1. Microcontrolador que permita correr un sistema operativo en tiempo real.
2. Fuente de alimentación.
3. Sensores inerciales (giróscopo, acelerómetro, magnetómetro)
4. Puertos de comunicación.
5. Salidas para los controladores de motores.

Como se detalló en la sección II, esta plataforma ha de ser programable y compatible con dispositivos de consumo masivo que serán en última instancia las terminales de control, operadas por el usuario y vinculadas mediante el transceptor de tecnologías múltiples.

IV-B. Requisitos optativos de Hardware

Para cada aplicación, puede que haya uno o más de los siguientes componentes:

1. Barómetro.
2. Sensor de Ultrasonido.
3. Cámara.
4. Módulo de alta capacidad de cómputo.
5. Conexión USB.

IV-C. Plataforma desarrollada

La estructura desarrollada sigue los lineamientos que pueden observarse en la Figura 3. En la misma se presentan diferentes bloques del sistema con un nivel de abstracción alto, donde los bloques más críticos para mantener el vuelo se encuentran en la base del diagrama. Se aprecia además la interconexión entre los diferentes módulos.

La placa desarrollada puede observarse en la Figura 4. La misma cuenta con un microprocesador de la familia Cortex-M4, IMU 9DOF, barómetro, módulo WiFi, pines de propósito general y con la posibilidad de agregar XBee, GPS y una computadora de alto rendimiento Raspberry Pi 2 compatible. En caso que se requiera expandir las funcionalidades de dicha plataforma, la misma cuenta con el factor de forma PCIe/104 OneBank [9], permitiendo utilizar computadoras que dispongan de dicha conectividad, tal como lo es la CIAA-ACC.

IV-D. Comunicación modular

Como ya se mencionó en la sección II, además de la estación de tierra y la computadora a bordo se necesita compatibilizar la comunicación a nivel de hardware con dispositivos de consumo masivo que en última instancia serían los terminales de control y operación en los que se ejecutaría la plataforma de software anterior. En estos dispositivos la interfaz de red inalámbrica mediante protocolo UDP y TCP se encuentra disponible. Hemos de desarrollar un conversor de protocolo para fusionar las tecnologías y que la comunicación sea transparente a nivel de aplicación.

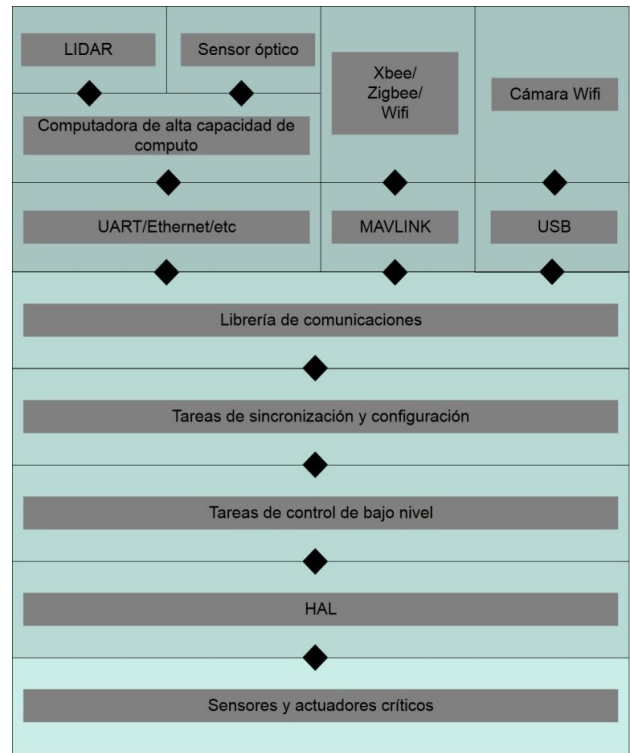


Figura 3. Esquema de capas del sistema desarrollado

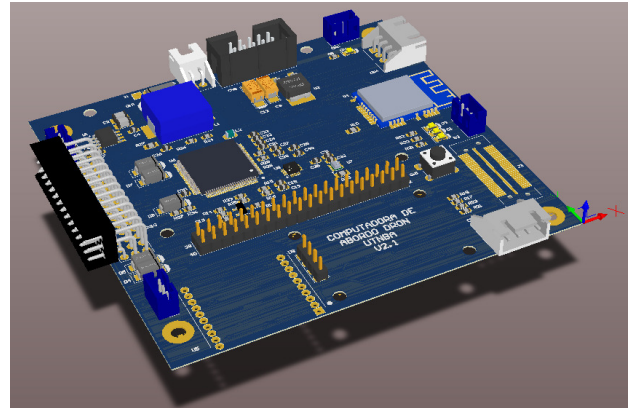


Figura 4. Plataforma de hardware desarrollada

IV-E. Diagrama en bloques

En el diagrama en bloques de la Figura 5 puede observarse la estructura completa del sistema desarrollado, considerando todos sus módulos optativos.

V. SISTEMA DE COMUNICACIONES DESARROLLADO

V-A. Elección de tecnologías compatibles

Conforme a todo lo dicho anteriormente el módulo transceptor ha de concentrar las tecnologías más utilizadas y al mismo tiempo más aptas para el manejo de vehículos aéreos autónomos. El módulo transceptor quedará, a nivel de bloques, como puede observarse en la Figura 6.

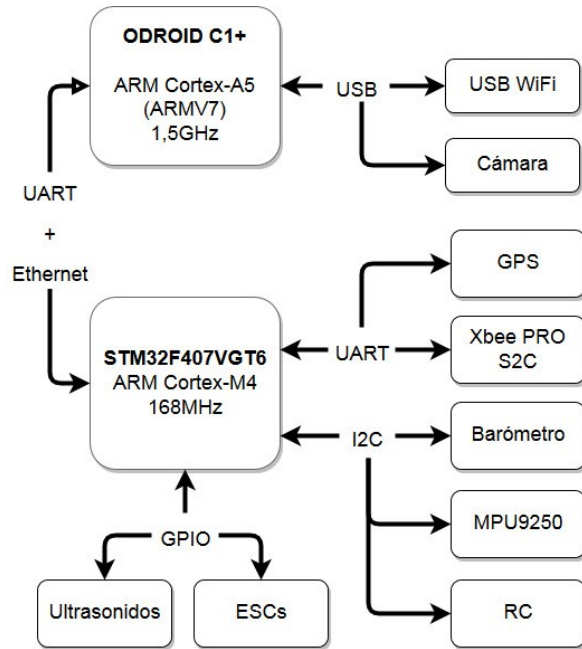


Figura 5. Estructura del controlador de vuelo desarrollado

El hardware debe soportar el envío de datos mediante enlace TCP/IP vía protocolo IEEE802.11. Se espera que la instalación fija del transceptor esté cercana al terminal del usuario. Asimismo debe concentrar todas las tecnologías finalmente elegidas, a saber:

- Interfaz WiFi para streaming de vídeo desde la computadora de a bordo de nuestro dron.
- Interfaz ZigBee para las señales de control.
- Un canal de datos móviles para suplir la deficiencia en el alcance de WiFi.
- Comunicación mediante protocolo TCP/IP con el terminal del usuario.

Por otro lado, serán condiciones de diseño que el sistema sea versátil, programable y autónomo, para tomar decisiones críticas.

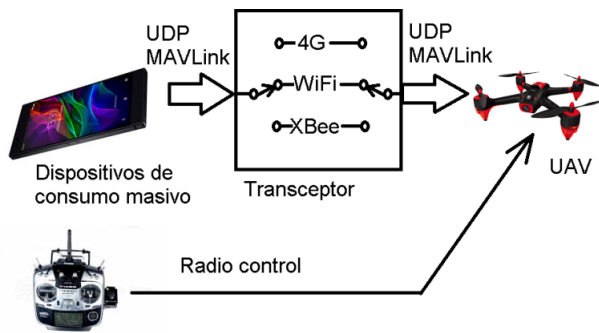


Figura 6. Estructura del controlador de comunicaciones desarrollado

VI. INTERFAZ CON EL USUARIO DESARROLLADA

Tomando en consideración los requisitos básicos que debe cumplir cualquier interfaz de control de un VANT, y contem-

plando los estudios previos realizados sobre el diseño de las mismas [8], observamos que a gran escala QGroundControl [10] cumple con algunos de los lineamientos sugeridos. Si bien este no cumple todas las condiciones para el óptimo desempeño de tareas a nivel profesional, la interfaz se presenta cómoda e intuitiva a fines puramente educacionales.

El control de los drones se realiza a través de acciones sobre el mapa, por ejemplo, despegar, aterrizar o moverse a un punto, las cuales enviadas al dron como comandos MAVLink. También es posible utilizar un joystick o un mando RC para realizar un control manual de la actitud del vehículo. En esta instancia de desarrollo del firmware propio, se implementó un sistema de control que permite mantener la actitud del dron constante respecto del suelo. Por otro lado, es posible maniobrar al vehículo a través de un joystick conectado a la estación terrena.

Con el objetivo de realizar ensayos, se desarrolló una nueva ventana para el QGroundControl (Figura 7). Esta ventana incluye opciones para fijar la velocidad de cada motor y para mostrar las mediciones tomadas por los sensores inerciales y magnéticos del dron. La sección Control sólo se puede utilizar cuando está activo el Modo mantenimiento, el cual como medida de seguridad no puede activarse si el dron está volando.

Además se implementó la posibilidad de variar los parámetros del controlador PID desde la estación de tierra, a través del envío de mensajes de MAVLink conteniendo los parámetros deseados.

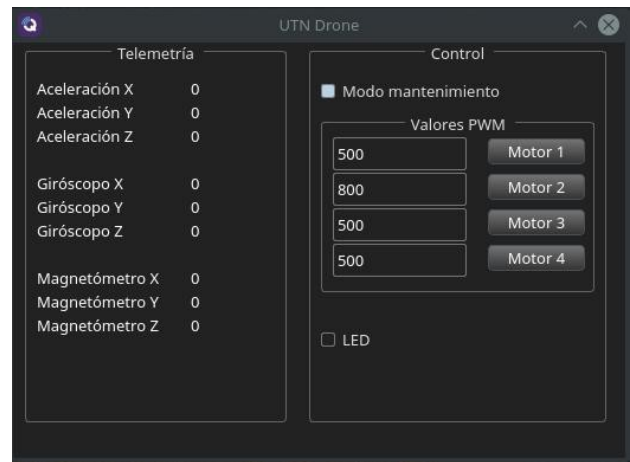


Figura 7. Ventana desarrollada para ensayos

Una herramienta útil que trae el QGroundControl es la ventana Analyze, que grafica los valores recibidos desde el dron en función del tiempo. Se colocó al dron en un banco de ensayo y se lo dejó estabilizar a través del control implementado en el firmware. En la Figura 8 se grafica la evolución del pitch según los datos enviados al QGroundControl desde el dron, cuando está estabilizado en el banco de pruebas. En la Figura 9 se observa el cambio en los ángulos de Euler al inclinar el vehículo. Al soltar el vehículo, el controlador lo estabiliza nuevamente y los ángulos de Euler en este caso se muestran

en la Figura 10. La actitud del dron se ve reflejada tanto en la ventana Analyze como en el indicador ubicado a la derecha del mapa.

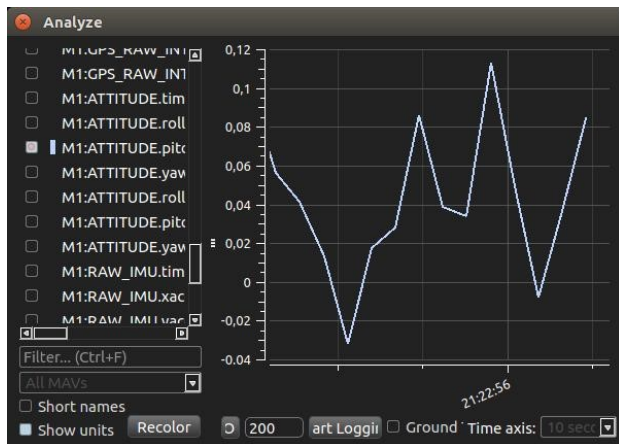


Figura 8. Evolución del ángulo de pitch en función del tiempo.

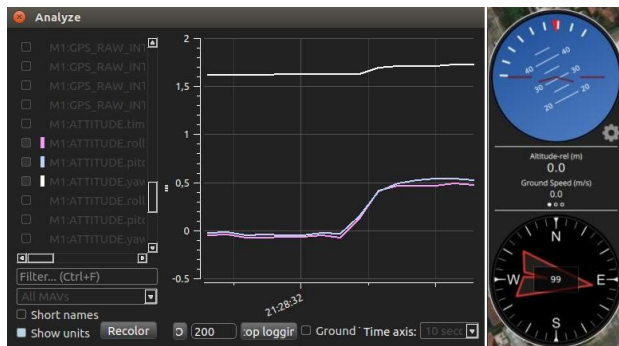


Figura 9. Evolución de los ángulos de Euler al inclinar el dron en el banco de pruebas.

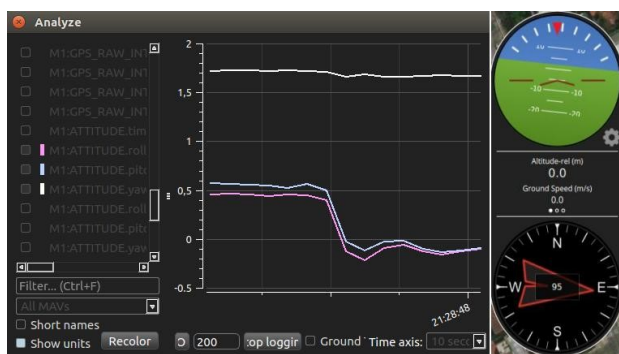


Figura 10. Evolución de los ángulos de Euler al soltar el dron y dejar que vuelva a la posición de equilibrio.

CONCLUSIONES

En base a los distintos diseños existentes en la actualidad, se logró desarrollar un sistema UAV, presentado en la Figura 11, el cual le permite al usuario el control del mismo y la toma

de los datos de interés. El sistema también es configurable de acuerdo a la aplicación específica para el cual sea requerido. Además, el software de estación terrestre, al ser muy versátil, admite la posibilidad de extender las funcionalidades según las necesidades de cada vehículo en particular. Se logró extender el código de la estación terrestre agregando funciones de utilidad para la plataforma propuesta.

En el futuro se ampliarán las funcionalidades de la estación de tierra, agregando opciones relativas a la calibración de los sensores del dron, y otras que permitan monitorear las mediciones realizadas.



Figura 11. Imagen del vehículo ensamblado.

REFERENCIAS

- [1] AUSTIN, R. (2010). Unmanned Aircraft Systems. John Wiley & Sons Ltd.
- [2] Ardupilot Project. Disponible en <http://ardupilot.org>. [Recuperado el: 23-Jun- 2014].
- [3] CHENGQI, X.; CEN, Q.; YAN, Z. (2009). Design and research of human-computer interaction interface in autopilot system of aircrafts.
- [4] SABIKAN, S.; NAWAWI, W. (2016). Open-Source Project (OSPs) Platform for Outdoor Quadcopter. Journal of Advanced Research Design, 2462-1943 | Vol. 24, No. 1, p. 13-27.
- [5] GABRIEL, D.; MEYER, J.; PLESSIS, F. (2011). Survey of Autopilot for Multi-rotor Unmanned Aerial Vehicles. The Falls Resort and Conference Centre, Livingstone, Zambia.
- [6] PEREZ, D.; MAZA, I.; CABALLERO, F.; Scarlatti, D.; CASADO, E.; OLLERO, A. (2013). A Ground Control Station for a Multi-UAV Surveillance System. Design and Validation in Field Experiments.
- [7] PESCHEL, J. M.; MURPHY, R. R. (2015). Human Interfaces in Micro and Small Unmanned Aerial Systems. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, 2389-2403.
- [8] CALHOUN, G. L.; DRAPER, M. H. (2015). Display and Control Concepts for Multi-UAV Applications. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, 2443-2473.
- [9] PC/104 Consortium. (2015) PCI/104-Express & PCIe/104 Specification. Version 3.0.
- [10] QGroundControl Project. [Online]. Disponible en www.qgroundcontrol.org. [Recuperado el: 14-Jul- 2019].