



Evaluation of a Remote Piloted Aircraft System (RPAS) for Agricultural Use (Part II)

Evaluación de Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS), para uso agrícola (Parte II).

Ing. Juan J. Pérez-Paredes, Dr. Gilberto J. López-Canteñs¹, Dr. Noé Velázquez-López, Dr. Irineo L. López-Cruz
Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Chapingo, Edo. México, México.

ABSTRACT. A prototype of a remote piloted aircraft system RPAS was evaluated. It was a quadcopter type, with a system that allows autonomous and stable flights to obtain georeferenced images, through the instrumentation of a RGB sensor (Sony IMX117) and a GPS. The RPAS was built and equipped with a Pixhawk controller with GPS, 1400kv race star engines, eight-inch propellers (8045) and 30A ESC. The “ArduCopter V3.611” firmware was installed in the flight controller (specific for quadcopters) and the accelerometer, compass, radio, flight modes (loiter, stabilize and RTL) and 20 mA telemetry were calibrated. In addition, the flight and control parameters of the RPAS were adjusted, with a horizontal and vertical forward speed of 1 m/s, maximum flight height of 30m, minimum flight voltage of 10.5v and an adjustment in the PID control of $P=0.046$, $I=0.047$ and $D=0.0036$ in the roll and pitch axes and values of $P=0.1$, $I=0.025$ and $D=0.5$ in the yaw axis. Flight tests were performed in autonomous missions with a constant speed of 1 m/s, at a height of 20m and with winds not higher than 5 Km/h. An average consumption of 1520 mAh was obtained for 7 minutes of flight, vibrations less than 18 m/s^2 and movements in the “yaw”, “pitch” and “roll” axes smaller than 6 degrees.

Keywords: Drone, Design, Telemetry, Flight Scheduling, Georeferencing.

RESUMEN. Se realizó la evaluación de un prototipo de sistema de aeronave pilotada remotamente RPAS, tipo cuadricóptero, con un sistema que permite la realización de vuelos autónomos y estables para la obtención de imágenes georreferenciadas, mediante la instrumentación de un sensor RGB (Sony IMX117) y un GPS. Se construyó un RPAS, equipado con una controladora Pixhawk con GPS, motores race star de 1400kv, hélices de ocho pulgadas (8045) y ESC de 30 A. En la controladora de vuelo se instaló el firmware “ArduCopter V3.611” (específico para cuadricópteros), se calibró el acelerómetro, el compás, el radio, modos de vuelo (loiter, stabilize y RTL) y la telemetría a 20 mA. Además, se ajustaron los parámetros de vuelo y control del RPAS, con una velocidad de avance horizontal y vertical de 1 m/s, altura máxima de vuelo de 30m, voltaje mínimo de vuelo de 10.5v y un ajuste en el control PID de $P=0.046$, $I=0.047$ y $D=0.0036$ en los ejes roll y pitch y valores de $P=0.1$, $I=0.025$ y $D=0.5$ en el eje yaw. Se realizaron pruebas de vuelo en misiones autónomas con una velocidad constante de 1 m/s, a una altura de 20m y con vientos no mayores a 5 Km/h. Obteniéndose un consumo promedio de 1520 mAh por 7 minutos de vuelo, vibraciones menores a 18 m/s^2 y movimientos en los ejes “yaw”, “pitch” y “roll” menores a 6 grados.

Palabras clave: RPAS, Diseño, Telemetría, Programación de vuelo. Georreferenciación

INTRODUCTION

Different designs have been proposed for RPAS platforms, showing a strong development for flight, control, and landing in an autonomous way, with global positioning

INTRODUCCIÓN

Se han propuesto diferentes diseños para plataformas RPAS, mostrando un fuerte desarrollo para el vuelo, control y aterrizaje de forma autónoma, con los dispositivos de po-

¹ Author for correspondence: Gilberto J. López-Canteñs, e-mail: alelopez10@hotmail.com

devices (GPS) (Galimov *et al.*, 2020). However, the challenge is to correctly select the components in an RPAS platform, so that it meets the desired needs and objectives (Christiansen *et al.*, 2017).

The adequate selection of the elements for prototypes allows the implementation of different control strategies, for the stabilization of the quadcopter axes (Lara *et al.*, 2017). To use this resource efficiently, it is necessary to establish coordination between the controller and monitoring systems for the RPAS, to determine its route based on the environment and to program it in a safe, collision-free, and time-efficient manner (Thibbotuwawa *et al.*, 2020).

Pixhawk 4, a navigation and flight control system hardware, consists of an inertial measurement unit (IMU) (gyros and accelerometers), magnetometer (compass), barometer and global positioning system (GPS) module (Pei *et al.*, 2019). The system must be calibrated for safety and performance (Vargas, 2015; Gyujin *et al.*, 2020), in addition to the configuration of flight parameters and a correct adjustment in the PID control (proportional, integral and derivative), which regulates the corrections of errors due to disturbances caused by wind or differences in the engines and propellers (Bonney *et al.*, 2020). The PID controller is widely used in UAV flight control due to its high control accuracy and simple structure (Dávila *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018, 2019)

Considering the necessary characteristics that aircraft must have to be used in precision agriculture, the objective of this work was to evaluate a RPAS type quadcopter, according to an established flight configuration and PID control, with a system that allows autonomous and stable flights to obtain georeferenced images in a sequential way, through the instrumentation of an RGB sensor.

MATERIALS AND METHODS

RPAS Prototype

A quadcopter type RPAS prototype was used (Figure 1) which was developed at the facilities of the Universidad Autónoma Chapingo, equipped with a Hawkeye Firefly 8SE RGB camera with the IMX117 Sony sensor. The flight controller model pixhawk, which it uses, is open source and supervises the RPAS operation in the different flight modes, controls the camera and the gimbal turns and georefers the images that are captured.

sicionamiento global (GPS) (Galimov *et al.*, 2020). Aun así, el desafío es seleccionar correctamente los componentes en una plataforma RPAS, para que cumpla con las necesidades y objetivos deseados (Christiansen *et al.*, 2017).

La adecuada selección de los elementos para prototipos permite implementar diferentes estrategias de control, para la estabilización de los ejes del cuadricóptero (Lara *et al.*, 2017). Para utilizar este recurso de manera eficiente, es necesario establecer una coordinación entre la controladora y sistemas de monitoreo para el RPAS, para determinar su ruta basada en el medio ambiente y programarlo de manera segura, sin colisiones y eficiente en el tiempo (Thibbotuwawa *et al.*, 2020).

Pixhawk 4, un hardware de sistema de navegación y control de vuelo, consiste en una unidad de medida inercial (IMU) (giroscopios y acelerómetros), magnetómetro (brújula), barómetro, módulo del sistema de posicionamiento global (GPS) (Pei *et al.*, 2019). El sistema debe estar calibrado para la seguridad y el rendimiento (Vargas, 2015; Gyujin *et al.*, 2020). Además de la configuración de parámetros de vuelo, y un correcto ajuste en el control PID (proporcional, integral y derivativo), que regula las correcciones de los errores ocasionados por las perturbaciones originadas por el viento o diferencias en los motores y las hélices (Bonney *et al.*, 2020). El controlador PID se utiliza ampliamente en el control de vuelo de UAV debido a su alta precisión de control y simple estructura (Dávila *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018, 2019).

Teniendo en cuenta las características necesarias con que deben contar las aeronaves para uso en la agricultura de precisión, el objetivo del presente trabajo es evaluar un RPAS, tipo cuadricóptero, de acuerdo una configuración de vuelo establecida y control PID, con un sistema, que le permite la realización de vuelos autónomos y estables para la obtención de imágenes georreferenciadas en forma secuencial, mediante la instrumentación de un sensor RGB.

MATERIALES Y MÉTODOS

Prototipo RPAS

Se utilizó un prototipo de RPAS, tipo cuadricóptero (Figura 1), desarrollado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo, equipado con cámara RGB Hawkeye Firefly 8SE con el sensor sony IMX117. La controladora de vuelo modelo pixhawk, que utiliza, es de código abierto y supervisa el funcionamiento del RPAS en los diferentes modos de vuelo, controla la cámara y los giros del gimbal, además georreferencia las imágenes que son capturadas.



FIGURE 1. RPAS Prototype.
FIGURA 1. Prototipo de RPAS.

Pixhawk Configuration

The “ArduCopter V3.611” firmware was installed in the flight controller and it was configured with the “Mission Planner” program, a tool that provides, in a simple and graphic way, aircraft configurations based on the communication and control protocol “MAVLINK” (Reyes, 2017). The firmware, “ArduCopter V3.611” (specific for quadcopters) was loaded; the accelerometer, compass, radio, flight modes (loiter, stabilize and RTL) were calibrated and so was the telemetry to 20 mA. In addition, the flight and control parameters of the RPAS were adjusted, in the “Full Parameter List”, with a horizontal and vertical forward speed of 1 m/s, maximum flight height of 30m, and minimum flight voltage of 10.5v (activating the autonomous return home, RTL).

An important adjustment is the PID control (Proportional, Integral and Derivative), which regulates the corrections of errors due to disturbances caused by wind or differences in the motors and propellers (Nistal, 2017; Zhang *et al.*, 2019). PID control is a feedback control mechanism that calculates the deviation or error between the desired and the measured values (Serrano, & Pérez, 2016).

The PID controller generates an output signal to counteract the error between the controlled variable and a reference value of the system (Berra, 2016). The control law is based on Equation 1.

$$PID = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(t) dt + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Where: *t*: Time, *e*: Error, *k_p*, *k_i*, *k_d*: Constants, *k_p* · *e* (t): Proportional action, *k_i* · ∫₀^t *e* (t) dt: Integral action, *k_d* · $\frac{de(t)}{dt}$: Derivative action.

In autonomous missions, the pixhawk flight controller, incorporates a PID control, which corrects the altitude and stability (Figure 2). The control is based on the values calculated by the IMU and the barometer, which measure the angle of the vehicle and the height, respectively. These values are compared with those desired, to calculate the error, and thus, apply it to the control system (Bonney *et al.*, 2020).

In Figure 2, the PID control diagram of the pixhawk flight controller, used to correct stability and height, is developed. The value “Roll” is the rotation on the X axis, allowing the displacement to the right or left. The value “Pitch”, is the rotation on the Y axis, allowing the displacement forward or backward. The value “Yaw”, is the rotation on the Z axis, allowing the rotation on its vertical axis (Vargas, 2015; Dávila *et al.*, 2017; Nistal, 2017).

In Table 1, the PID control settings of the RPAS, which were used in the flight missions for the speed P and height PID values, are shown.

Configuración Pixhawk

En la controladora de vuelo del se instaló el firmware “ArduCopter V3.611” y se configuro con el programa “Mission Planner”, una herramienta que proporciona de manera simple y gráfica la configuración de aeronaves basadas en el protocolo de comunicación y control “MAVLINK”(Reyes, 2017). Se cargó el firmware, “ArduCopter V3.611” (específico para cuadricópteros), se calibro el acelerómetro, el compás, el radio, modos de vuelo (loiter, stabilize y RTL) y la telemetría a 20 (mA). Además, se ajustaron los parámetros de vuelo y control del RPAS, en la lista “Full Parameter List”, con una velocidad de avance horizontal y vertical de 1 m/s, altura máxima de vuelo de 30 m, y voltaje mínimo de vuelo de 10.5 v (activando el regreso a casa autónomo, RTL).

Un ajuste importante, es el control PID (Proporcional, Integral, Derivativo), que regula las correcciones de los errores ocasionados por las perturbaciones originadas por el viento o diferencias en los motores y las hélices (Nistal, 2017; Zhang *et al.*, 2019). El control PID es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado (Serrano, y Pérez, 2016).

EL controlador PID, genera una señal de salida para contrarrestar el error existente entre la variable controlada y un valor de referencia del sistema (Berra, 2016). La ley de control está basada ecuación 1.

$$PID = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(t) dt + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

En donde: *t*: Tiempo, *e*: Error, *k_p*, *k_i*, *k_d*: Constantes, *k_p* · *e* (t):

Acción proporcional, *k_i* · ∫₀^t *e* (t) dt: Acción integral, *k_d* · $\frac{de(t)}{dt}$: Acción derivativa.

En misiones autónomas, la controladora de vuelo pixhawk, incorpora un control PID, que corrige la altitud y estabilidad (Figura 2). El control se basa en los valores calculados por la IMU y el barómetro, los cuales miden el ángulo del vehículo y la altura, respectivamente. Estos valores son comparados con los deseados, para calcular el error, y así aplicarlo al sistema de control (Bonney *et al.*, 2020).

En la Figura 2, se desarrolla el diagrama de control PID, de la controladora de vuelo pixhawk, utilizado para corregir la estabilidad y altura. El valor “Roll”: es la rotación sobre el eje X, permitiendo el desplazamiento hacia la derecha o izquierda. El valor “Pitch”, es la rotación sobre el eje Y, permitiendo el desplazamiento hacia adelante o hacia atrás. El valor “Yaw”, es la rotación sobre el eje Z, permitiendo rotar sobre su eje vertical (Vargas, 2015; Dávila *et al.*, 2017; Nistal, 2017).

En la TABLA 1, se muestra los valores de ajuste del control PID del RPAS, que utilizaron en las misiones de vuelo. Para los valores P de velocidad y PID de altura.

Table 1. Adjusting PID Control
TABLA 1. Ajuste del control PID

Extended parameters of tuning for PID control (Mission Planner)			
P values for stabilizing speed error			
Roll	Pitch	Yaw	Position X,Y
P=4.0	P=4.0	P=4.0	P=1
PID values for stabilizing angle errors			
Roll value	Pitch value	Yaw value	XY speed

Extended parameters of tuning for PID control (Mission Planner)			
P values for stabilizing speed error			
Roll	Pitch	Yaw	Position X,Y
P=0.046	P=0.046	P=0.10	P=2
I= 0.047	I=0.047	I=0.025	I=1
D=0.0036	D= 0.0036	D=0	D=0.5
PID values to stabilize heigh error (Throttle Accel)			
P=0.5			
I=1.0			
D=0.0			

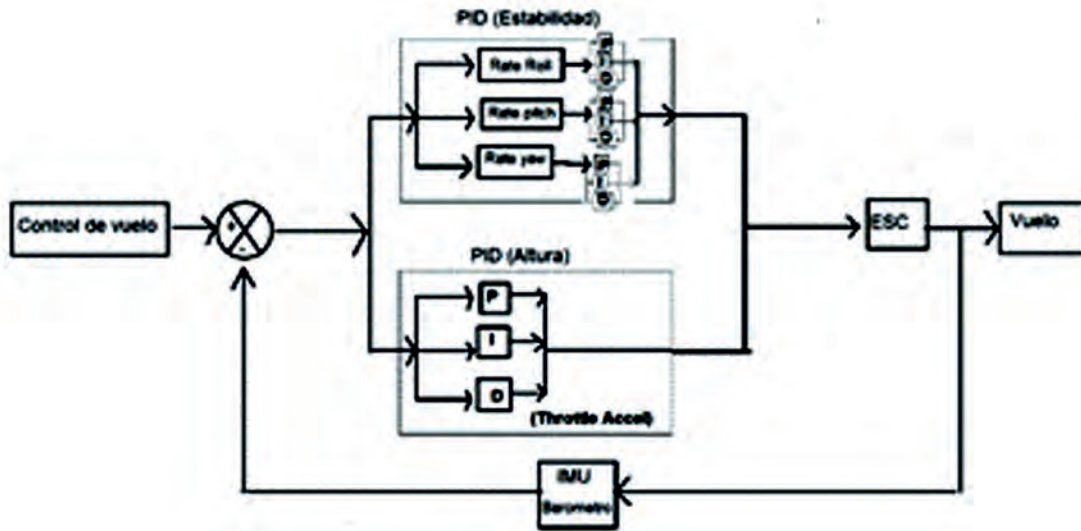


Figure 2. Diagram of the PID control, used to correct height and angles, of the pixhawk flight controller
 FIGURA 2. Diagrama del control PID, utilizado para corregir altura y ángulos, de la controladora de vuelo pixhawk.

Prototype RPAS Evaluation

The evaluation was carried out in the experimental field “Tla-peaxco”, of the Autonomous University Chapingo, in Texcoco, State of Mexico, North Latitude 19°28’57.41”, West Longitude -99°6’33.69 (Figure 3). It was developed by means of autonomous flight missions, which were carried out at an altitude of 20m, with a horizontal advance speed of 1m/s and with winds no greater than 5km/h, covering an area of 2258 m² (0.23 ha).

To plan the flight (in the field), a mobile device (cell phone) was used with the “Qground Contol” application, in addition, the cell phone was linked to the RPAS via telemetry (Figure 4).



FIGURE 3. Flight of the RPAS.

FIGURA 3. Vuelo del RPAS.

Evaluación del prototipo RPAS

La evaluación se realizó en el campo experimental “Tla-peaxco”, de la Universidad Autónoma Chapingo, en Texcoco, Estado de México, Latitud Norte 19°28’57.41”, Longitud Oeste -99°6’33.69 (Figura 3). Mediante misiones de vuelos autónomos, que se realizaron a una altura de 20m, con una velocidad de avance horizontal de 1 m/s y con vientos no mayores a 5km/h, cubriendo un área de 2258 (0.23 ha).

Para planificar el vuelo (en campo), se utilizó un dispositivo móvil (celular) con la aplicación “Qground Contol”, además, el celular estaba enlazado al RPAS mediante telemetría (Figura 4).



FIGURE 4. RPAS, radio control and telemetry.

FIGURA 4. RPAS, radiocontrol y telemetría.

In the Qground Control application, the flight area was defined and the overlap parameters of the photographs were adjusted with 75% front and 65% side (Figure 5) as recommended by Ortega (2018). The parameters of the sensor Sony IMX117 of the camera Hawkeye Firefly 8SE, that was used in the RPAS, were adjusted with a width of 6.17 mm and a length of 4.55 mm, a resolution of 4608 pixels in the width and 3456 in the height and a focal distance of 3mm (Figure 5).

En la aplicación de Qground Control, se definió el área de vuelo y ajustaron los parámetros de traslape de las fotografías con un 75% frontal y un 65% lateral (Figura 5) (recomendado por Ortega (2018). Los parámetros del sensor sony IMX117, de la cámara Hawkeye Firefly 8SE que se utilizó en el RPAS, se ajustaron con un ancho de 6.17 mm y un largo de 4.55 mm, una resolución de 4608 píxeles en lo ancho y 3456 en lo alto y una distancia focal de 3 mm (Figura 5).



Figure 5. Flight planning in “Qground Control”.
FIGURA 5. Planificación del vuelo en “Qground Control”.

Other values that were adjusted were the departure and return points in the flight mission. These values were defined in the point where the RPAS was at the time of setting up the mission (positioned on a flat surface and without weeds).

Otros valores que se ajustaron fueron: el punto de salida y el punto de regreso en la misión de vuelo, estos valores se definieron en el punto en donde se encontraba el RPAS en el momento de configurar la misión (posicionado en una superficie plana y sin maleza).

After setting the mentioned values, the application calculates the number of photos to take and in which location (waypoints), according to the configured overlap and the characteristics of the camera (Navarro, 2019). In Figure 6, green points indicate where the pictures were taken.

Después de ajustar los valores mencionados, la aplicación calcula la cantidad de fotos que debe tomar y en qué localización (waypoints), de acuerdo con el traslape configurado y las características de la cámara (Navarro, 2019). En la Figura 6, se observan los puntos (en verde), en donde se tomaron las fotografías.

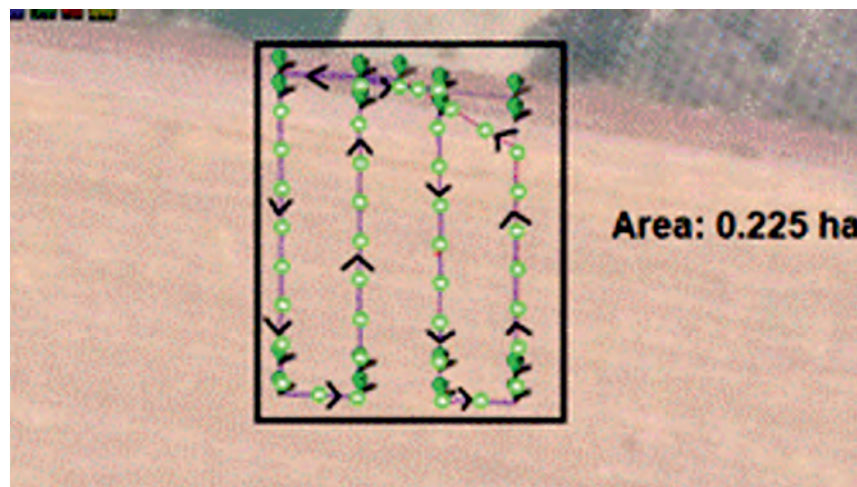


FIGURE 6. Flight Plan Waypoints
FIGURA 6. Waypoints del plan de vuelo.

The flight plan (configured) was uploaded to the RPAS (via telemetry) and the flights were performed. The application showed the progress of the vehicle in real time and the characteristics of the flight as time of flight, battery status and satellite reception.

Processing

The information generated by the different sensors that the vehicle has, such as speed, height, battery voltage, current consumption, geographic position, vibrations and position angle (X, Y and Z), was stored by the flight controller.

The flight records were downloaded using Mission Planner, in a Matlab (.mat) read file, so, it was necessary to convert the information into a (.xlsx) file, using a developed programming code. With the information in a file (.xlsx), Microsoft Excel spreadsheet reading format, the desired values were plotted.

Analysis of the RPAS Prototype Functioning

Three flight missions were performed and the parameters of voltage, power consumption, current, spin, vibration and flight altitude were measured and used for the evaluation of the RPAS performance, which were then plotted and analyzed.

In Figure 7, the behavior of the battery voltage during the three flight missions is shown. The flight controller detects the battery voltage (actual voltage) and makes a correction (corrected voltage), because the actual voltage drops quickly, caused by the current supplied to the ESC.

In this study, the real voltage was used to evaluate the state of the battery and to configure the safe return home (RTL), which is configured to activate, when detecting minimum voltages of 10.5v in the battery. Bonney *et al.* (2020), mention that the value of the corrected battery voltage can be used to extend the duration of the flight, but it reduces the battery life.

In Figure 7, it is observed that in the first 30s, negative peaks appear in the real voltage; this is because, at that time, the RPAS began its ascent to 20 m high, causing a sudden drop in voltage. As the time elapses, the voltage decreases from 12.5v (full load) to 10.4v, limiting the flight to approximately 7 minutes (because the return home RTL is configured with a minimum voltage of 10.5v).

El plan de vuelo (configurado), se cargó al RPAS (mediante telemetría), y se realizaron los vuelos, la aplicación mostro el avance del vehículo en tiempo real y características del vuelo como, el tiempo de vuelo, el estado de la batería y recepción satelital.

Procesamiento

La información generada por los distintos sensores que posee el vehículo, como velocidad, altura, voltaje de la batería, consumo de corriente, posición geográfica, vibraciones y ángulo de posición (x,y,z), fue almacenada por la controladora vuelo.

Los registros de vuelo se descargaron mediante Mission Planner, en un archivo de lectura de Matlab (.mat), por lo cual, se necesitó convertir la información en un archivo (.xlsx), mediante un código de programación desarrollado. Con la información en un archivo (.xlsx), formato de lectura de hoja de cálculo de Microsoft Excel, se graficaron los valores deseados.

Análisis del funcionamiento del prototipo RPAS

Se realizaron tres misiones de vuelo y se midieron los parámetros de voltaje, consumo, corriente, giro, vibración y altura de vuelo, que se utilizaron para la evaluación del funcionamiento del RPAS, los cuales se graficaron y analizaron, a continuación.

En la Figura 7, se observa el comportamiento del voltaje de la batería, durante las tres misiones de vuelo. La controladora de vuelo detecta, el voltaje de la batería (voltaje real) y realiza una corrección (voltaje corregido), debido a que, el voltaje real, desciende rápidamente, ocasionado por la corriente suministrada a los ESC.

En nuestro caso, se utilizó el voltaje real, para evaluar el estado de la batería y configurar el regreso seguro a casa (RTL), el cual está configurado para activarse, al detectar voltajes mínimos de 10.5 v en la batería. Bonney *et al.* (2020), mencionan que se puede utilizar el valor del voltaje corregido de la batería, para alargar la duración del vuelo, pero reduce la vida útil de la batería.

En la Figura 7, se observa que en los primeros 30s aparecen picos negativos en el voltaje real, esto es debido a que, en ese momento, el RPAS inicio su ascenso a 20 m de altura, ocasionando un descenso brusco de voltaje. Conforme al tiempo transcurrido, el voltaje disminuye de los 12.5 v (carga completa) hasta los 10.4v, limitando el vuelo a aproximadamente 7 minutos (debido a que el regreso a casa RTL está configurado con un voltaje mínimo de 10.5 v).

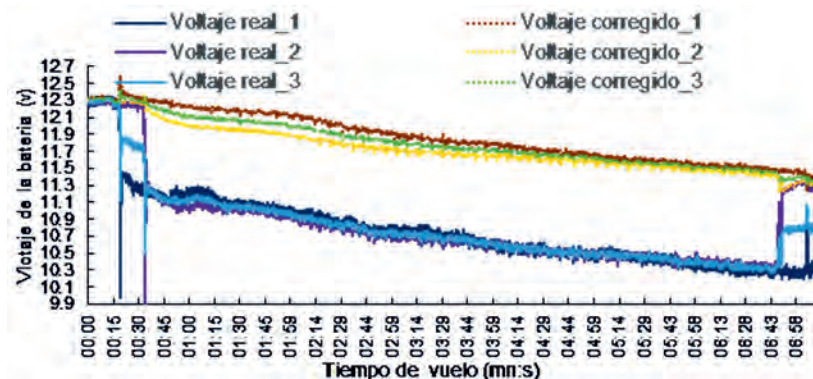


FIGURE 7. Voltage of the RPAS during the flight.

FIGURA 7. Voltaje del RPAS durante el vuelo.

The average consumption of the battery in the three flights was 1520 mAh, for 7 minutes of flight (approximately) (Figure 8), a 38% of the total capacity of the battery (4,000 mAh), so, the battery can support the double of flight time (theoretically), if the minimum voltage safety factor is configured according to the corrected voltage and not to the real voltage, increasing considerably the flight time.

As mentioned in the power calculation section, the battery can supply a continuous current of 200A, to power all electronic components. In Figure 8, it is observed that the maximum current, which was required during the flights, was not greater than 23A.

El consumo medio de la batería en los tres vuelos fue de 1520 mAh, por 7 minutos de vuelo (aproximadamente) (Figura 8), un 38 % de la capacidad total de la batería (4,000 mAh), por lo que, la batería puede soportar el doble de tiempo de vuelo (teóricamente), si el factor de seguridad de voltaje mínimo se configura conforme al voltaje corregido y no al voltaje real, aumentando considerablemente el tiempo de vuelo.

Como se mencionó en la sección de cálculo de potencia, la batería puede suministrar una intensidad de corriente continua de 200A, para poder alimentar todos los componentes electrónicos. En la Figura 8 se puede comprobar que la intensidad máxima de corriente, que se requirió durante los vuelos, no fue mayor a 23 A.

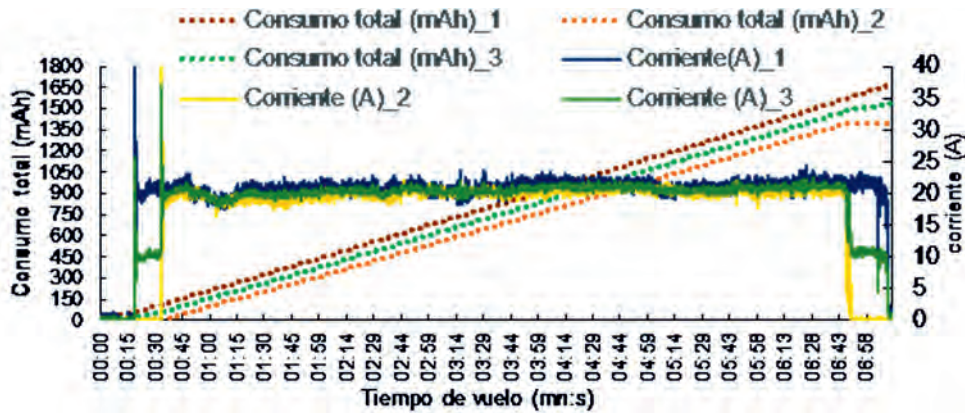


Figure 8. Consumption (A) and current (A) of the RPAS.
 FIGURA 8. Consumo (A) y corriente(A) del RPAS.

One of the important points to evaluate the stability of a RPAS is the rotation in the axes “Roll”, “Pitch” and “Yaw”. These values represent the inclination of the vehicle in its 3 axes of movement (Fernandez *et al.*, 2016). To evaluate this factor, two flight missions were performed, which are shown in Figures 9 and 10 where the rotation for “Roll” and “Pitch” in the autonomous flights of the RPAS, vary from -6° to 5°, these values did not exceed the limits recommended by Bonney *et al.* (2020) for “Roll” and “Pitch”.

The “Yaw” turn has values of 0-360° because the changes of the trajectory are represented (turn on its own axis). In addition, the origin is oriented to the north, so any takeoff with the front of the RPAS that is not oriented to the north will have values of 0-360°.

Uno de los puntos importantes para evaluar la estabilidad de un RPAS, es el giro en los ejes “Roll”, “Pitch” y “Yaw”, estos valores representan la inclinación del vehículo en sus 3 ejes de movimiento (Fernández *et al.*, 2016). Para evaluar este factor se realizaron dos misiones de vuelo, que se muestran en la Figura 9 y Figura 10, en donde se puede apreciar que el giro para “Roll” y “Pitch” en los vuelos autónomo del RPAS, varían de -6° a 5°, estos valores, no superaron los límites recomendados por Bonney *et al.* (2020), que son para “Roll” y “Pitch”.

El giro en “Yaw” posee valores de 0-360°, debido a que, se representan los cambios de la trayectoria (giro sobre su propio eje), además, el origen está orientado al norte, por lo que cualquier despegue con el frente del RPAS que no esté orientado al norte tendrá valores de 0-360°.

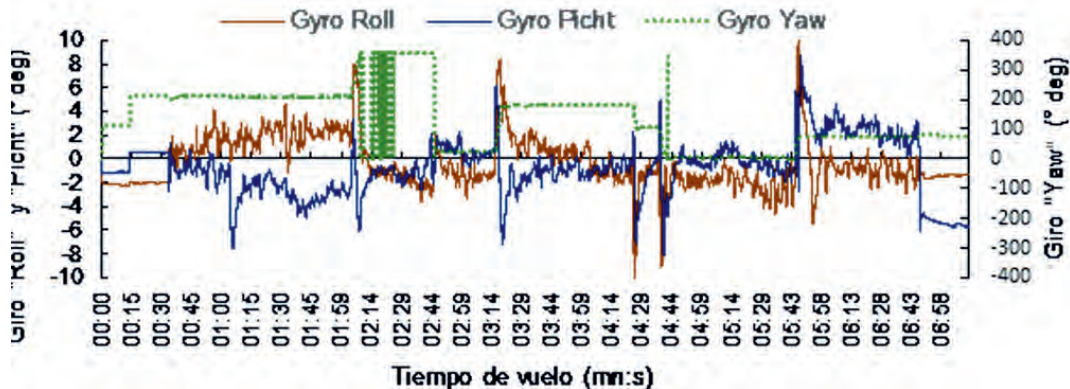


FIGURE 9. Roll, Pitch and Yaw of the RPAS (flight 1).
 FIGURA 9. Giro en “Roll”, “Pitch” y “Yaw” del RPAS (vuelo 1).

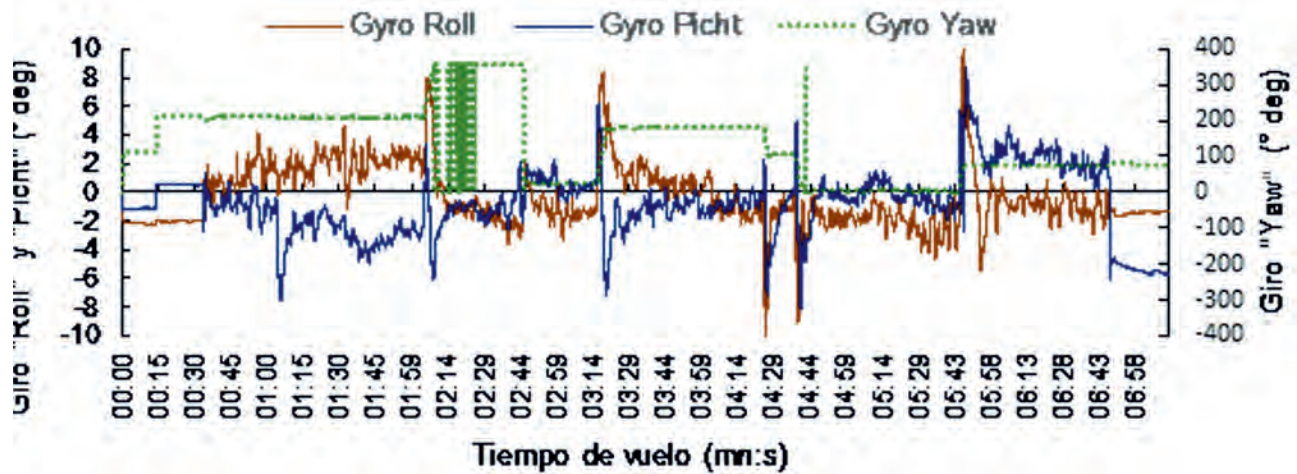


FIGURE 10. Roll, Pitch and Yaw of the RPAS (flight 2)
 FIGURA 10. Giro en "Roll", "Pitch" y "Yaw" del RPAS (vuelo 2).

Another parameter that was used to evaluate the stability of the RPAS was vibration, which is the propagation of waves that produce deformations and stresses on the chassis (repetitive movements around the position of equilibrium) (Bonney *et al.*, 2020). In Figure 11, it is observed that the average vibration (of the three flights), is between 6 and 16 m/s^2 , therefore, the values obtained are within the parameters recommended by Bonney *et al.* (2020) of 0-30 m/s^2 .

In the first 30 seconds of flight, the vibration ranged from 3 to 18 m/s^2 , this is because an air bubble is generated between the soil and the RPAS, as the lift disappears the bubble and the vibrations are reduced. It is not possible to decrease this vibration with the PID control settings, only with flight heights greater than 5m the vibration disappears (Bonney *et al.*, 2020).

Otro parámetro que se utilizó para evaluar la estabilidad el RPAS, fue la vibración, que es la propagación de ondas, que producen deformaciones y tensiones sobre el chasis (movimientos repetitivos alrededor de la posición de equilibrio) (Bonney *et al.*, 2020). En la Figura 11 se observa que la vibración media (de los tres vuelos), se encuentra entre 6 y 16 m/s^2 , por lo tanto, los valores obtenidos están dentro de los parámetros recomendados por Bonney *et al.* (2020) de 0-30 m/s^2 .

En los primeros 30 segundos de vuelo, la vibración oscilaba de 3 a 18 m/s^2 , debido a que se genera una burbuja de aire entre el suelo y el RPAS, conforme el ascenso la burbuja desaparece y las vibraciones disminuyen. Esta vibración, no es posible disminuirla con los ajustes en el control PID, solo con alturas de vuelo mayores a 5m desaparece la vibración (Bonney *et al.*, 2020).

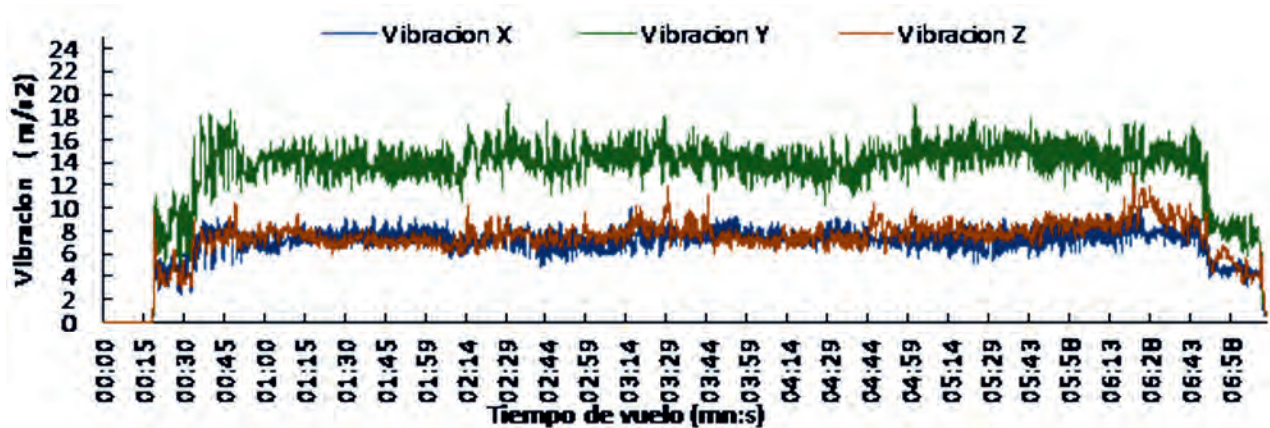


FIGURE 11. Average Vibration in "X", "Y" and "Z".
 FIGURA 11. Vibración media en "X", "Y" y "Z".

The average values of height (m) and altitude (m.a.s.l), of the three flights were obtained (Figure 12). These values are generated by the barometer, which measures the atmospheric pressure, and corrected by the accelerometer (Bonney *et al.*, 2020). The PID control performed the correction of the flight height, maintaining the height at 20 m with an error of $\pm 0.5m$, an accepted error in photogrammetry.

Se obtuvieron los valores medios de altura (m) y altitud (msnm), de los tres vuelos (Figura 12). Estos valores, son generados por el barómetro, que mide la presión atmosférica y corregidos por el acelerómetro (Bonney *et al.*, 2020). El control PID realizo la correccion de la altura de vuelo, manteniendo la altura en 20 m con un error de 0.5m, un error aceptado en la fotogrametria.

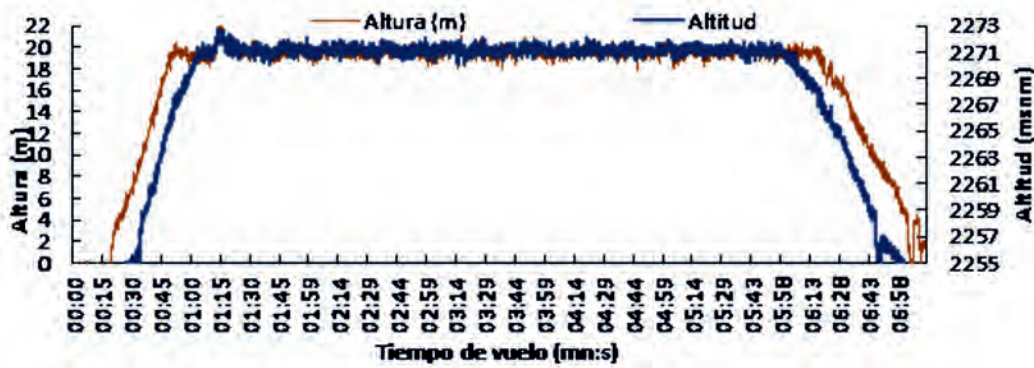


FIGURE 12. Average height of the RPAS on flights.
 FIGURA 12. Altura media del RPAS en los vuelos.

It was obtained the graph of the behavior of PID control values, which correct the flight height (Figure 13). In the first three seconds the value of the proportional action “P”, ranges from ± 200 and the integral action from -150 to 15, this is because the RPAS has initiated the flight and the parameters seek to reduce the height error according to time. After three seconds, the PID control, stabilizes the height that the system requires and the error tends to zero.

Se obtuvo la gráfica del comportamiento de los valores de control PID, que corrigen la altura de vuelo (Figura 13). En los primeros tres segundos el valor de la acción proporcional “P”, oscila de 200 y la acción integral de -150 a 15, esto es debido a que el RPAS ha iniciado el vuelo y los parámetros buscan reducir el error de altura conforme al tiempo. Después de tres segundos, el control PID, estabiliza la altura que el sistema desea y el error tiende a cero.

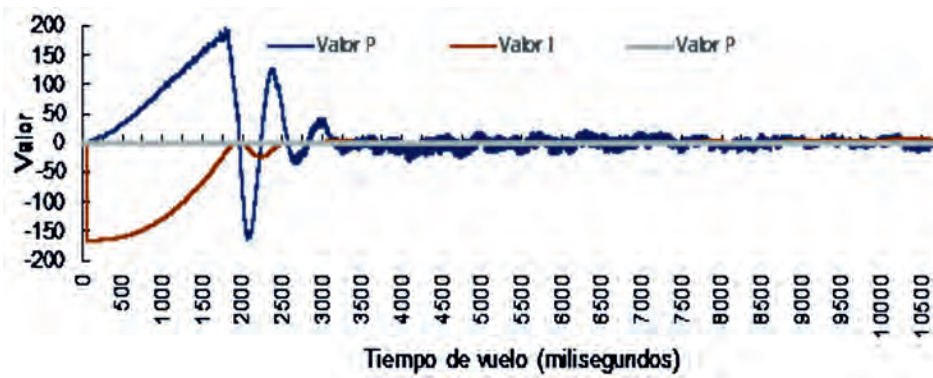


Figure 13. Altitude PID Control Values.
 FIGURA 13. Valores del control PID de altitud.

The behavior of the PID control values of the pitch (Y-axis) and roll (X-axis) axes was plotted in Figures 14 and 15. The RPAS, when starting the flight is on a flat surface, so the PID control detects that the error is close to zero, in the second three, the RPAS starts the climbing and that is when the PID control decreases the errors quickly, with a stabilization time of two seconds, obtaining a robust behavior.

El comportamiento de los valores del control PID de los ejes pitch (eje Y) y roll (eje X), se graficó en la Figura 14 y Figura 15. El RPAS, al iniciar el vuelo se encuentra en una superficie plana, por lo que el control PID detecta que el error es cercano a cero, en el segundo tres, el RPAS inicia el ascenso y es cuando el control PID disminuye los errores rápidamente, con un tiempo de estabilización de dos segundos, obteniendo un comportamiento robusto.

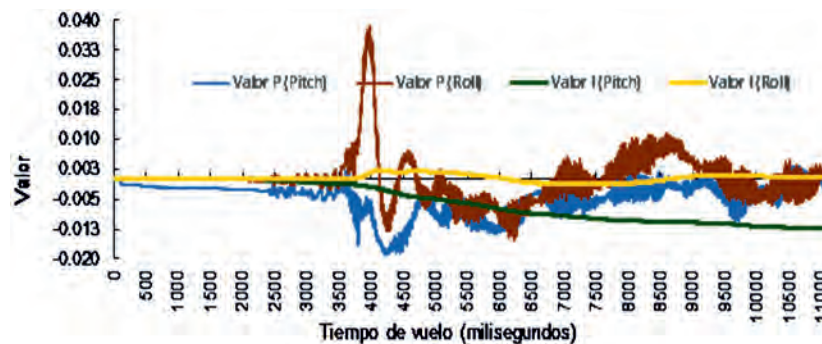


Figure 14. Pitch and roll P and I control values.
 FIGURA 14. Valores del control P y I de pitch y roll.

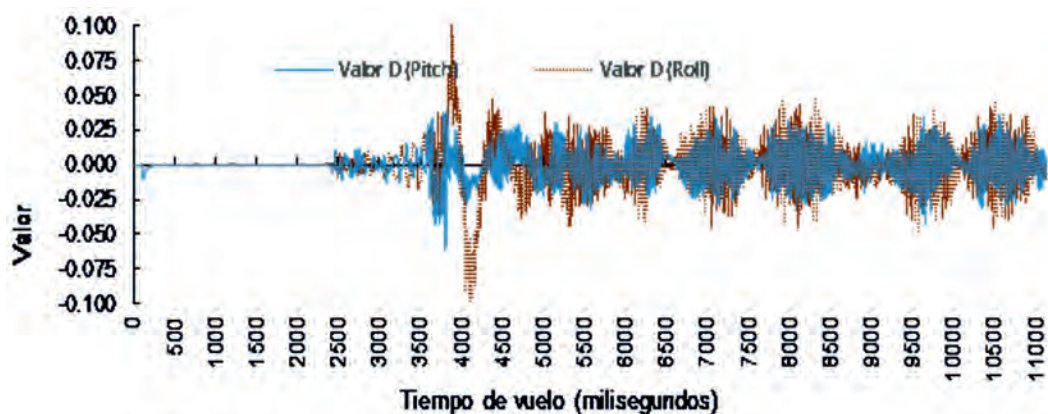


Figure 15. Pitch and roll D control values
 FIGURA 15. Valores del control D de pitch y roll.

CONCLUSIONS

- The operation of the RPAS was evaluated in terms of its electrical consumption, obtaining a 7-minute flight with a total consumption of 1520 mAh, using 38% of the total battery capacity and a final voltage of 10.3v, in flights with a height of 20m and a horizontal speed of 1 m/s.
- The PID control adjustments were made, with values of $P=0.046$, $I=0.047$ and $D=0.0036$ in the roll and pitch axes and values of $P=0.1$, $I=0.025$ and $D=0.5$ in the yaw axis, obtaining a robust behavior of the system, with a stabilization time of two seconds, average vibrations of 9 m s^{-2} which range from 6 to 18 m s^{-2} and an average rotation of 3 degrees on the X and Y axes. Therefore, it can be concluded that stability is among the appropriate parameters to be able to use RPAS in photogrammetry.

CONCLUSIONES

- Se evaluó el funcionamiento del RPAS en cuanto a su consumo eléctrico, obteniendo un vuelo de 7 minutos con un consumo total de 1520 mAh, al utilizar el 38% de la capacidad total de la batería y un voltaje final de 10.3v, en vuelos con una altura de 20m y una velocidad horizontal de 1 m/s.
- Se realizaron los ajustes del control PID, con valores de $P=0.046$, $I=0.047$ y $D=0.0036$ en los ejes roll y pitch y valores de $P=0.1$, $I=0.025$ y $D=0.5$ en el eje yaw, obteniendo un comportamiento robusto del sistema, con un tiempo de estabilización de dos segundos, vibraciones promedio de 9 m s^{-2} , que oscilan entre 6 y 18, y un giro promedio de 3 grados en los ejes X y Y. Por lo que se puede concluir que la estabilidad se encuentra entre los parámetros adecuados para poder utilizar el RPAS en fotogrametría.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- BERRA, E.V.: "Cálculo de variables de control PID para Drones Cuadcopter", *Reaxión, Revista de Divulgación Tecnológica*, 1(9), 2016, ISSN: 2007-7750.
- BONNEY, B.; SIDDHARTH, B.P.; SHAMAEV, E.; WALSER, J.; GONÇALVES, L.V.; OLSON, C.O.; QUILTER, S.: *Ardupilot.org/ardupilot/index*, [en línea], Ardupilot, 2020, Disponible en: <https://ardupilot.org/ardupilot/index.html>, [Consulta: 19 de agosto de 2020].
- CHRISTIANSEN, M.P.; STIGAARD, M.; NYHOLM, J.R.; SKOVSEN, S.; GISLUM, R.: "Designing and Testing a UAV Mapping System for Agricultural Field Surveying", *Sensors*, 17(12), 2017, DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/s17122703>.
- DÁVILA, P.; ORNA, J.; ROSALES, A.; ÁVALOS, E.: "Diseño, Construcción de la Estructura Mecánica y Pruebas de Vuelo de un Hexacóptero de Monitoreo para Aplicaciones Militares", *Revista Politécnica*, 39(1): 37-39, 2017, ISSN: 1390-0129.
- FERNÁNDEZ, B.H.A.; TORRES, I.J.; RAMÍREZ, U.: *Diseño, Construcción y Control de una Aeronave Tipo Dron*, [en línea], Universidad Nacional Autónoma De México, Tesis de Licenciatura, Mexico, 248 p., 2016, Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx>.
- GALIMOV, M.; FEDORENKO, R.; KLIMCHIK, A.: "UAV Positioning Mechanisms in Landing Stations: Classification and Engineering Design Review", *Sensors*, 13(20), 2020, DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/s20133648>.
- GYUJIN, J.; JAEYOUNG, K.; JU, Y.; HAK, J.K.; YOONHA, K.; DONG, K.; YONG, S.C.: "Review: Cost-Effective Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform for Field Plant Breeding Application", *Remote Sens.*, 12(6): 2-20, 2020, DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/rs12060998>.
- LARA, S.B.M.; FAGUA, P.E.Y.; SALAMANCA, J.M.; HIGUERA, M.O.I.: "Diseño e implementación de un sistema de control de vuelo para un vehículo aéreo no tripulado tipo cuadracóptero", *Revista Tecnología y Cultura, afirmando el conocimiento (TECNURA)*, 21(53), 2017, DOI: <https://dx.doi.org/10.14483/22487638.10256>. ISSN: 0123-921X.
- NAVARRO, R.D.: *Análisis de un Sistema de Vuelo de Rpas con Controladora Px4 y Subsistema de Visión*, [en línea], Universidad Carlos III de Madrid, Tesis de Licenciatura, Madrid, España, 111 p., 2019, Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/30300>.
- NISTAL, L.J.: *Diseño de un Drone Programable de Bajo Coste*, [en línea], Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones, Tesis de maestría, España, 132 p., 2017, Disponible en: <https://repositorio.unican.es>.
- ORTEGA, C.V.E.: *Procedimiento para la captura de datos fotogramétricos con la ayuda de aparatos controlados remotamente, como herra-*

- mienta para la evaluación en estabilidad de taludes y difusión con realidad aumentada, [en línea]*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Maestría, Colombia, 130 p., 2018, Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/69667/>.
- PEI, H.C.; DER, M.M.; JAW, K.S.E.: “Design, Manufacturing, and Flight Testing of an Experimental Flying Wing UAV”, *Applied Sciences*, 9(15), 2019, DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/app9153043>.
- REYES, P.P.: *Diseño de un Multicóptero para Investigación Controlado Vía Terminal Android, [en línea]*, Universitat Politècnica de València, Tesis de Licenciatura, Valencia, España, 84 p., 2017, Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/86467>.
- SERRANO, C.C.; PÉREZ, O.: *Análisis, Diseño Estructural y Construcción de un Dron para la Detección de Minas Antipersona, [en línea]*, Inst. Universidad Politécnica de Catalunya, Informe Técnico, España, 306 p., 2016, Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/102000?show=full>.
- THIBBOTUWAWA, A.; BOCEWICZ, G.; BOCEWICZ, G.; NIELSEN, P.; BANASZAK, Z.: “Unmanned Aerial Vehicle Routing Problems: A Literature Review”, *Applied Sciences*, 10(13), 2020, DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/app10134504>.
- VARGAS, F.L.M.: *Desarrollo de algoritmos para el seguimiento de trayectorias de un quadrotor utilizando técnicas modernas de control con álgebra lineal, [en línea]*, Escuela Politécnica Nacional, Tesis de Licenciatura, Ecuador, 101 p., 2015, Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11668>.
- ZHANG, H.; YANG, J.; JANTIENE, E.M.B.; SHUQIN, L.; BEI, J.; WENTING, H.; XIAOMEI, Y.: “Quality of terrestrial data derived from UAV photogrammetry: A case study of Hetao irrigation district in northern China”, *International Journal of 2018 Agricultural and Biological Engineering*, 11(3), 2018, DOI: <https://dx.doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3012>.
- ZHANG, K.; HONG, B.F.; LI, L.K.; LIANG, Y.; YANG, J.: “Design and Implementation of a Dual-IP Core UAV Flight Control” System Based on Qsys”, En: *3rd International Conference on Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR-2019), 3rd International Conference on Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR-2019)*, pp. 180–186, 2019, DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.045>.

Juan J. Pérez-Paredes, Estudiante Programa de Maestría en de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Posgrado IAUIA. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Textcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, México, e-mail: josjan_@hotmail.com ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5124-7781>

Gilberto J. López-Canteñs, Profesor Titular, Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Textcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, México, e-mail: alelopez10@hotmail.com ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7789-5880>

Noé Velázquez-López, Profesor Titular, Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Textcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, México, e-mail: nvelazquez@taurus.chapingo.mx ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5128-4929>

Irineo L. López-Cruz, Profesor Titular, Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Textcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, México, e-mail: alelopez10@hotmail.com ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0630-6257>

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.

FACILIDADES PARA PUBLICAR CONTRIBUCIONES EN REVISTAS CIENTÍFICAS

Si desean que su trabajo se publique en las revistas Ciencias Técnicas Agropecuarias (RCTA), Ingeniería Agrícola (IA) o Gestión del Conocimiento y desarrollo local , deben revisar en el sitio WEB www.unah.edu.cu las normas editoriales y contactar con los directores de las publicaciones.

CJAS: www.cjascience.com, Directora Editorial: Dra. Sandra Lok Mejías slok@ica.co.cu

Pastos y Forrajes: <https://payfo.ihatuey.cu> / <http://www.ihatuey.cu>, Editor Jefe: Dr. Osmel Alonso Amaro osmel@ihatuey.cu

Si desea publicar en revista técnico popular contactar con: Casa Editorial ACPA. Director. Jorge Luis Álvarez Calvo, revista@acpa.cu