



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2024,
Volumen 8, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5

DESARROLLO DE PROTOTIPO DRON X4 CLASE 550 ASPERSOR PARA USO AGRICOLA EL CAMPO GUERRERENSE

**DEVELOPMENT OF PROTOTYPE DRONE X4 CLASS 550
SPRINKLER FOR AGRICULTURAL USE EL
CAMPO GUERRERENSE**

Maritza Echeverria Santana

Investigador independiente

Angelino Feliciano Morales

Investigador independiente

Gustavo-Adolfo Alonso Silverio

Investigador independiente

Arnulfo Catalán Villegas

Investigador independiente

René-Edmundo Cuevas Valencia

Investigador independiente

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14065

Desarrollo de Prototipo Dron X4 Clase 550 Aspersor para uso Agrícola El Campo Guerrerense

Maritza Echeverría Santana¹22255122@uagro.mx<https://orcid.org/0009-0007-8725-4490>

Investigador Independiente

Angelino Feliciano Moralesafmorales@uagro.mx<https://orcid.org/0000-0002-7707-7319>

Investigador Independiente

Gustavo-Adolfo Alonso Silveriogsilverio@uagro.mx<https://orcid.org/0000-0002-2699-140X>

Investigador Independiente

Arnulfo Catalán Villegas03180@uagro.mx<https://orcid.org/0009-0001-0391-7960>

Investigador Independiente

René Edmundo Cuevas Valenciareneecuevas@uagro.mx<https://orcid.org/0000-0001-9528-7603>

Investigador Independiente

RESUMEN

Este artículo se centra en el desarrollo de un dron de configuración X4, clase 550, dedicado a la aspersión para su aplicación agrícola o de invernaderos. El prototipo basa su funcionamiento en la placa Pixhawk para la administración y control de sistemas de navegación, lo que su vuelve económico. El control del sistema aspersor adicionado, utilizo una placa Arduino nano, que interpreta la señal PWM (Modulación de posición de pulsos) proveniente de la placa de controladora y componentes electrónicos, se desarrolla un un interruptor, permitiendo controlar de y manipular de manera remota el sistema aspersor. El sistema propuesta incorpora dos boquillas con un abanico de aspersión de 134 cm, para la fumigación de un litro plaguicidas, en un tiempo de drenado de 2 minutos y 35 segundos determinados por la densidad de la sustancia química. Se analiza las características de selección de la electrónica y los dispositivos utilizados, así como las configuraciones y codificaciones necesarias para la implementación del prototipo. Este dispositivo de pruebas, servirá como base para el desarrollo de proyectos de mayor envergadura y con aplicabilidad para diversos tipos de especies vegetales, así como su modificación para la aplicación de granos o plaguicidas sólidos.

Palabras clave: configuración X4, controladora, dron, Pixhawk, PWM

¹ Autor principal

Correspondencia: 22255122@uagro.mx

Development of Prototype Drone X4 Class 550 Sprinkler for Agricultural Use El Campo Guerrerense

ABSTRACT

This article focuses on the development of an X4 configuration drone, class 550, dedicated to spraying for agricultural or greenhouse application. The prototype is based on the Pixhawk board for the management and control of navigation systems, which makes it economical. The sprinkler control system uses an Arduino nano board, which interprets the PWM (Pulse Position Modulation) signal coming from the controller board and electronic components, and develops a switch, allowing remote control and manipulation of the sprinkler system. The proposed system incorporates two nozzles with a spray fan of 134 cm, for spraying one liter of pesticides, in a drain time of 2 minutes and 35 seconds determined by the density of the chemical. The selection characteristics of the electronics and devices used are analyzed, as well as the configurations and codifications necessary for the implementation of the prototype. This test device will serve as a basis for the development of larger projects with applicability for various types of plant species, as well as its modification for the application of grains or solid pesticides.

Keywords: X4 configuration, controller, drone, Pixhawk, PWM

Artículo recibido 08 agosto 2024

Aceptado para publicación: 10 septiembre 2024



INTRODUCCIÓN

Datos de INEGI (2020), indican que el estado de Guerrero cuenta con una extensión del 3.2% del territorio Nacional y donde el 40% de este territorio pertenece a la población rural, que aportan el 5.6% del PIB correspondientes al sector primario. En el Estado, el 50% de su territorio se dedica a la producción de maíz, que consta de maíz grano blanco de 1,061,881.83 toneladas, el maíz forrajero con 541,218.21 toneladas (Gobierno del Estado de Guerrero, 2023). A nivel nacional, ocupa el primer lugar en producción de coco y mango, el segundo en ajonjolí, y el tercero en melón y cacao.

Según datos del censo agropecuario 2022 presentado por el Gobierno del Estado de Guerrero (2023), confirman los datos del censo realizado por el INEGI (2020), y agregan que el 21.2% de los productores agrícolas son personas mayores de 65 años, así mismo, que la tecnificación del campo a través de tractores ha visto un aumento del 142.9% a una tasa de crecimiento anual del 6.1%. Sin embargo, advierte que la agricultura del Estado enfrenta una crisis, provocada por el abandono del campo debido a los altos precios de los insumos y servicios agrícolas, que impiden o disminuyen la producción agrícola del campo.

En su Boletín del 06 de octubre del 2022, del Congreso del Estado, Diputados exhortan a desarrollar estrategias para el incremento y transformación de la producción del Estado, se destaca el hecho de que a pesar de tener los primeros lugares como productores existe falta de tecnificación que aseguren una producción comercial (Boletín, 2022). En este contexto aparece la agricultura de precisión la cual consiste en utilizar la innovación tecnológica, que hace uso de sensores, algoritmos de análisis de datos, Inteligencia Artificial (IA), GPS, robots y drones, teniendo como ventajas aplicaciones precisas, amigables con el ambiente y con mayor producción (Communications, 2023).

Este tipo de agricultura se ha visto ampliamente beneficiada por la utilización de drones (nombre popular para referirse a los vehículos aéreos no tripulados o VANT del tipo multirrotor), desde los equipados con sensores para detectar la salud de las plantas hasta los utilizados para la aplicación de productos químicos de manera focalizada. Estas aeronaves de apariencia simple, comparten muchas de las características de los aviones tripulados, como la aerodinámica, movimientos de ejes, movimientos de motores, diferenciándose del control de comando, es decir, utilizan diferentes tipos de microcontroladores y microprocesadores para navegación autónoma o semi autónoma.



En su artículo Barría & Villarroel (2021), presentan la aplicabilidad de drones equipados con cámara multiespectral, que les ayuda a conocer el traslape y la uniformidad del riego en campos del Sur de Chile, para estudiar la consistencia en el riego, la salud de la pradera, la identificación de equipos de riego con dificultades, posibles razones detrás de una uniformidad deficiente, entre otros datos.

Los drones en el ámbito de aspersión de pesticidas son altamente beneficiosos, debido a que pueden ingresar en terrenos accidentados o difícil acceso para las fumigaciones tradicionales, su renta o adquisición resulta más económica que los helicópteros aspersores o tractores, su fumigación es eficiente en campos pequeños e irregulares, y reducen la contaminación del producto, así como intoxicación del aplicador. Los VANT son sumamente utilizados en muchos países, el 30% de la producción agrícola de Corea del Sur los utilizan para actividades de aspersión, al igual que en Japón donde representa el 40% (Ozkan, 2024). Además Hanif (2022) de Phang et al. (2014), argumenta que su aplicación es 40 veces más veloz que la mochila bomba, más práctico que los tractores en cuanto a movilidad, se obtienen rendimientos superiores en cuanto a productividad y reducción de costos de aplicación.

En el municipio de Iguala de la Independencia el gobierno municipal con el Programa “Unidos Ganamos” en convenio con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), con el objetivo de impulsar la tecnificación en la aplicación de pesticidas para el control de plagas y malezas, llevaron a cabo fumigaciones de feromonas de confusión sexual y otros químicos no nocivos, en las localidades de Metlapa, Santa Teresa, El Naranjo, Tuxpan y Zacacoyuca; estas aplicaciones demostrativas tienen como objetivo incentivar el uso de drones fumigadores (CIMMYT, 2023).

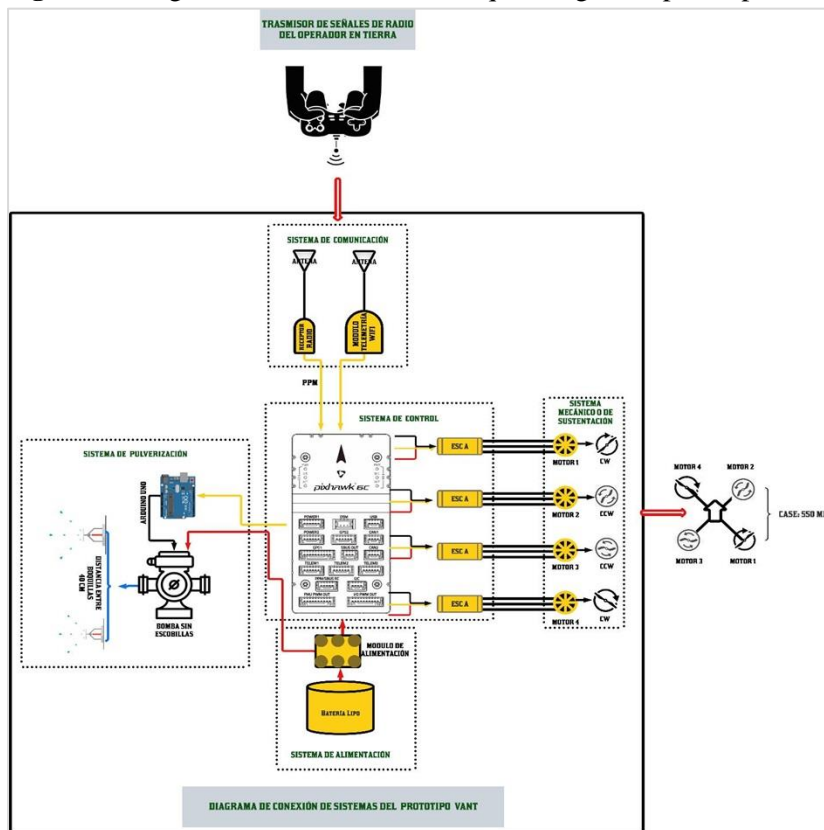
A pesar de los avances, en el Estado de Guerrero, este tipo de tecnificación aún está en su etapa inicial, derivado de costumbres, desconocimiento y, principalmente, el alto costo que implica para los campesinos adquirir un dron aspersor (ya que sus costos en México superan los \$10,000.00 dólares). Por lo anterior este proyecto tiene por objetivo desarrollar un prototipo de vehículo multirrotor del tipo cuadricóptero, de tamaño compacto, especializado en la aspersión de plaguicidas, con capacidad de carga útil de un litro y una autonomía de 8 minutos, de bajo costo, que beneficie e impulse a los sectores de horticultura ornamental y producciones agrícolas de subsistencia del estado de Guerrero.



MATERIALES

El prototipo consta de 5 sistemas vinculados para formar el dron aspersor, en la figura 1, se aprecian cada uno de ellos clasificados según su función. El sistema de control conforma la parte neurálgica de todos los sistemas, en él, se procesan las lecturas de los sensores que lo integran, se gestionan el control del sistema de sustentación, se envían y reciben señales desde estaciones en tierra a través del sistema de comunicación, por medio del sistema de alimentación se regula la transferencia de energía a todos los dispositivos. También es responsable de enviar las peticiones de control para la gestión del sistema de pulverización.

Figura 1. Diagrama interno de sistemas que integran el prototipo VANT.



Fuente: Construcción propia

Todos los VANT's multirrotores cuentan con la misma arquitectura de componentes internos (variando por la cantidad de motores utilizados), exceptuando la adición del sistema pulverizador. Para el desarrollo del prototipo propuesto, se establecen los lineamientos teóricos que promovieron la adquisición de los componentes que lo integran, sin embargo, se omiten las imágenes de referencia y solo se adiciona el concentrado en la tabla 1.

Es fundamental destacar que el peso total de todos los componentes involucrados impacta directamente sobre los rendimientos, el despliegue y tamaño del vehículo. En el prototipo desarrollado, los requerimientos están determinados en un peso inferior a los 3 kilogramos, la capacidad de adicionar un litro de líquido, tener una autonomía de 8 minutos y un costo económico. Con respecto a la información de la tabla 1, el costo de los elementos necesarios es inferior a los \$700.00 dólares, lo que convierte en una opción económica en comparación con drones comerciales. Además, el peso total de los componentes más significativos es inferior a los 2.300 kilogramos.

Tabla 1. Definición de componentes del prototipo.

Componente	Especificación	Tipo de sistema	Precio g	Precio US
Estructura	Marco de cuadricóptero de fibra de carbono ZD550 clase 550	Mecánico	630	\$54.33
Controladora de vuelo (FC)	Pixhawk PX4 Autopilot PIX 2.4.8	Electrónico	70	\$152.83
Fuente de alimentación energética	Bacteria Lipo 5000mah 11.1v 3s 50c Tindlineg	Potencia	346	\$84.34
Placa de distribución	Placa de distribución de energía PDB	Electrónico	10	\$9.67
Motores (4)	Brushless 5010 750KV	Mecánico	320	\$50.98
Hélices (4)	Hélice bipala 12x4.5	Mecánico	32	\$4.24
4 Electronic Speed Control (ESC)	ESC 40 ^a Readytosky	Electrónico	132.8	\$23.50
Emisora de radio control – emisor	Control Remoto Con Fs-i6 Flysky De 6 Canales Con Planeador D	Electrónico	14.9	\$100.12
Telemetría	Telemetría de radio de 500 MW, 915 Mhz	Electrónico	18	\$65.44
Placa	Placa Arduino nano	Electrónico	22	\$5.40
Contenedor de agua	Depósito de agua universal para 1.2 Lt	Mecánico	422	\$13.84
Boquillas (2)	Teejet Boquilla, Filtro Tipo L Antigoteo	Mecánico	240	\$50.81
Bomba de agua	Bomba De Agua De Diafragma 1/2 Interfaz 60w 5 L/min Dc 12 V	Mecánico	150	\$24.76
Relevador	Módulo relevador 5V DC	Electrónico	18	\$2.53
Cargador - balanceador	Cargador Baterías Lipo Imax B6 80w.	Electrónico	No aplica	\$42.14
Totales			2,292.9	\$684.93

La estructura es la parte central del multirroto, da forma al vehículo, recubre sus partes y es la responsable de tener montados todos los dispositivos y la electrónica relacionada con el funcionamiento

de los cuadricópteros (Kilby & Kilby, 2015). El fuselaje, chasis, estructura, marco o frame; se encuentra determinado por el tipo de configuración seleccionada, es decir, la cantidad y ubicación de sus motores (tricopteros, cuadcoptero X, H o +; hexacoptero Y, IY, X, I, H; octacoptero I8, V8, X6). Es importante al seleccionar materiales de fabricación que ofrezcan flexibilidad, resistencia y ligereza.

El sistema de control está determinado por la FC y los sensores que interactúan con ella. Los sensores son los dispositivos utilizados por la controladora para conocer su ubicación y registrar sus movimientos, los más importantes son los acelerómetros, giroscopios, que generalmente integran la IMU (Unidad de Medición Inercial), así como los sensores de posicionamiento global, entre otros (Meléndez, 2017).

La Flight Controller (FC) o controladora de vuelo, integrado por un procesador, que incorpora software de control conocido como firmware es responsable del procesamiento de las lecturas de sensores y comunicaciones con el piloto, que da como respuesta el manejo de motores y otros elementos como cámaras o dispositivos adicionales (Meléndez, 2017).

La FC, puede utilizar cualquier tipo de microcontrolador o microprocesador capaz de procesar todas las entradas y salidas solicitadas a altas frecuencias, lo que reduce significativamente el costo de construcción, sin embargo, el tiempo se aumenta de desarrollo. Existen en el mercado, gran variedad de FC, tanto de software propietario como de código abierto, siendo el primero más caras y con restricciones de mejora, mientras el segundo abarata el precio del dispositivo y permite contribuir en el desarrollo y mejora del mismo. Esta investigación se centra en una FC que incorpore un software de control código abierto. Se ha elegido la FC pixhawk 2.4.8, que utiliza el firmware Ardupilot y como software de configuración Mission Planner, los cuales son software open source (Ardupilot, 2024).

El sistema de sustentación se encuentra conformado por los motores, variadores y hélices. En cuanto a los motores proporcionan la potencia al vehículo. Entre los utilizados para el uso en multirrores, están los de tipo brushless o sin escobillas, que se caracterizan por sus altos rendimientos en comparación con su peso, así como sufrir menos desgastes, gracias a que el estator se encuentra fijo mientras el rotor se encarga del movimiento rotacional (Martínez, 2019).

Las características técnicas al tener en cuenta son, la constante de rotación Kv, que señala la cantidad de revoluciones por minuto (RPM) que proporciona el motor respecto a la cantidad de voltaje

proporcionado, es decir, por cada voltio a un motor de 1000Kv, se obtendrán 1000 rotaciones por minuto (Meléndez, 2017).

Otra variable es el empuje proporcionado por el motor, respecto al voltaje, lo cual señala el peso que es capaz de sustentar a partir de la ecuación 1, Espitia & Santiago (2022). Donde la E , es el empuje proporcionado por el motor. La variable Et , es la estimación del peso total del vehículo. La M , indica la cantidad de motores utilizados. La R , refiere la relación empuje/ peso (Espitia & Santiago, 2022). Muchos autores por norma de seguridad recomiendan relaciones de: 8:1, 5:1, 2:1, entre otras (López, 2021).

$$E = \frac{R*Et}{M} \quad \text{Ec. 1.}$$

Estos motores requieren de un circuito electrónico, conocido como ESC (Electronic Speed Controller), responsable de regular su velocidad y sentido de giro (Fernández, 2017). Drones pequeños utilizados para uso recreativo, suelen utilizar placas programadas para realizar la conmutación de los ESC. Para seleccionar un ESC es necesario elegir uno que soporte una corriente mayor que la requerida por los motores y cuya configuración sea compatible con la FC seleccionada.

Las hélices son las responsables del desplazamiento del VANT, logrando este movimiento al empujar el aire en trayectoria inversa a su avance, permitiendo su impulso. El material utilizado puede ser fibras de carbono y naylon, plástico y otros materiales reciclados. Sin embargo, su elección es una proporción entre resistencia, peso y precio. Otro factor de elección, determina el sentido de giro de las hélices, en configuraciones mayores o iguales a cuatro motores, la mitad de las hélices debe girar en sentido horario (CW o clockwise) y la otra mitad en CWW, es decir, sentido antihorario o counterclockwise (Meléndez, 2017).

Las hélices vienen denotadas por una nomenclatura, el primer dígito indica su longitud (distancia entre las puntas) en pulgadas. El segundo dígito establece el paso de la hélice (pitch), que indica el avance teórico que la hélice producirá en cada revolución completa (Fernández, 2016). Otro punto a considerar es el material utilizado para su construcción, con características similares que el utilizado para el frame. Para la operación del VANT con el operador es necesario utilizar un mando de control remoto, este dispositivo es responsable de transferir las órdenes a la FC desde la estación en tierra, dicha señal es

recibida por el módulo receptor que se encuentra a bordo (Inglés, 2021). El mando necesita al menos 4 canales, para los movimientos manuales del VANT, además, se recomienda que el emisor y receptor, pertenezcan al mismo fabricante, para evitar problemas de vinculación. Existen varios protocolos de comunicación entre la receptora y la FC, PPM (Modulación de posición de pulsos). PWM (modulación por ancho de pulso) o S-BUS, lo que determina la cantidad de canales que se deben de conectar a la FC para la transmisión de información.

Las antenas de telemetría son utilizadas por los drones para la transferencia o lectura de información en tiempo real así como contenido multimedia. Al igual que el control remoto, se requiere de un mando (emisor) y un receptor, además de que la FC cuente con puertos para la adaptación y vinculación de la antena receptora.

El sistema de alimentación se conforma, por la placa de distribución de corriente y voltaje y baterías. La placa de distribución consiste en un circuito que permite conectar todos los ESC, así como otros dispositivos que requieran de 5 u 12 V. La mayoría de los multicopteros, utilizan baterías a bordo para el suministro energético. Las más utilizadas son el tipo Li-Po (polímero de litio) que cuentan con gran capacidad de almacenamiento, alta tensión, volumen y peso reducido, lo que las hace la opción actual más ideal y altas descargas (Fernández, 2017).

Los detalles técnicos de selección número de celdas, voltaje nominal y potencia, capacidad e índice máximo (C) o Índice de descarga. La ecuación 2, determina capacidad de carga de la batería adecuada para las necesidades del multicoptero, a partir del consumo solicitado por los motores y el tiempo requerido de funcionamiento del VANT (Espitia & Santiago, 2022). Donde Capacidad: Capacidad de la batería (Ah), T: tiempo de vuelo requerido (minutos) y Corriente: Corriente solicitada de los motores (A).

$$\text{Capacidad} = \frac{T * \text{Corriente}}{60} = Ah \quad \text{Ec. 2.}$$

Adicionar el sistema aspersor implica incorporar otros componentes que realicen la función de asperjarse. Como boquillas, mangueras, tanque de almacenamiento, bomba y microcontrolador, requeridos para este sistema. Teejet (2004), advierte que la eficiencia de un plaguicida es proporcional con la boquilla seleccionada. Él recomienda una distancia máxima 75 cm entre boquillas, en una

relación de 1:1, considerando que la boquilla seleccionada cuenta con un ángulo de 80 °C, para establecer la altura máxima en la que debe encontrarse la boquilla del objeto asperjado, la cual no debe ser mayor de 80 cm, obteniendo una cobertura de 130 cm.

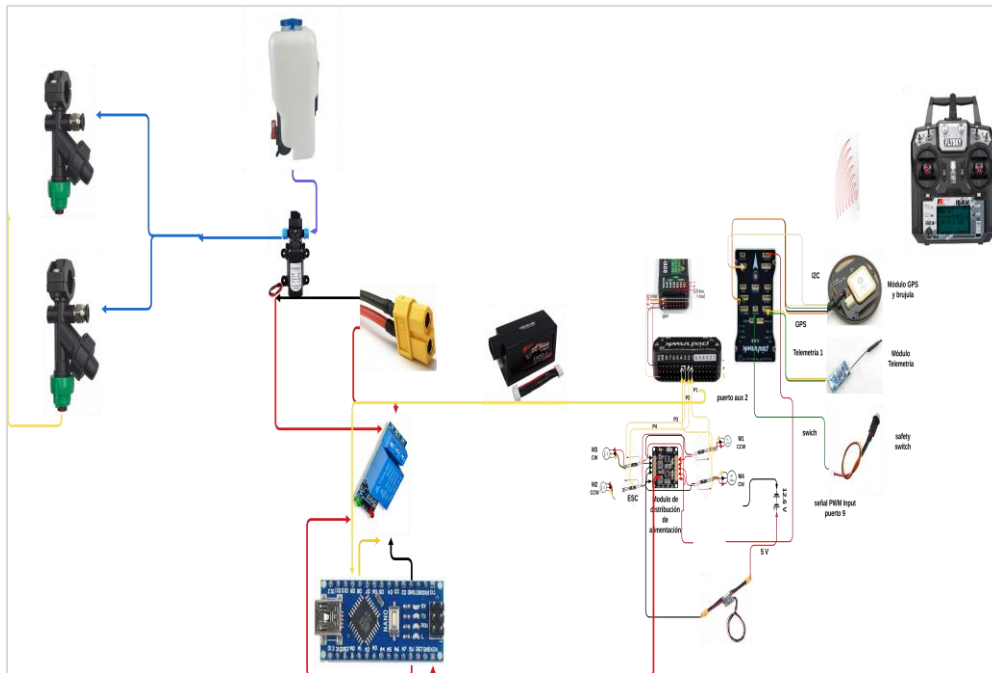
Otros componentes utilizados esenciales son la bomba de agua, esta determina la presión del líquido expulsado a través de la boquilla, las características técnicas consideradas son consumo de corriente, peso, tamaño y fuerza de presión. El contenedor de líquido necesario para el transporte del componente a dispersar. Su elección radica en la capacidad de almacenamiento, forma y tamaño del mismo. Además adiciona el modulo relevador, determinado por el voltaje de operación y el voltaje de conmutación. Para el procesamiento de los PWM y control del relevador, se utilizará la placa Arduino nano, ya que por su tamaño, cantidad de pines de entradas y salidas, así como procesamiento, es ideal para adicionar al prototipo.

MÉTODOS

Ríos et al. (2020), proponen la metodología Scrum, para el desarrollo de drones. La flexibilidad de este método, consiste en trabajar por etapas que no se ven perjudicadas por avances o retrocesos en el cumplimiento de ellas. Estas etapas consisten en recaudación de requerimientos del proyecto, análisis de las tecnologías disponibles, desarrollo del diseño, configuración de los sistemas y pruebas aplicadas, dando como resultado la entrega del producto final.

Atraves del esquema de la figura 2, se detalla el diseño de vinculación adoptado para el proyecto. En él, se muestra cada configuración de cableado entre dispositivos de cada sistema. El detalle del esquema permite identificar las conexiones de alimentación y transmisión de datos, facilitando el desarrollo de las vinculaciones al realizar el ensamble. Las líneas de color amarillo indican trasmisión de señales o datos, las rojas representan alimentación y negras la conexión a tierra (común).

Figura 2. Diagrama esquemático de prototipo.



A partir del diseño desarrollo fue posible el ensamble de prototipo mostrado en la figura 3, donde se puede observar el producto final. Con los siguientes datos técnicos: frame fibra de carbono de 550 mm, autonomía de 8 min, 1 litro de capacidad de carga útil, dando el peso total de 3.6 Kg, equipado con 2 boquillas, con una barra de 75cm de distancia entre boquillas, lo que consigue una cobertura de 134 cm.

Figura 3. Prototipo final.



La configuración comienza con la instalación de la aplicación en versión de escritorio, la cual puede obtenerse directamente desde la página oficial de Mission Planner. Posterior instalar la última versión de Firmware en la FC. La forma de corroborar la correcta instalación, se podrá observar en la interfaz de Misión Planner los movimientos de la FC.

Las configuraciones globales y requeridas, comienzan con la calibración del acelerómetro responsable de detectar las vibración y cambio de movimiento, por lo cual es crucial antes de comenzar cualquier otra configuración. Para este punto, se accede al Mission Planner y se selecciona la opción “Accel Configuration” (calibración del acelerómetro). En esta sección, se proporcionan instrucciones para detectar los movimientos de los ejes rotacionales del vehículo mediante giros en diferentes orientaciones, como izquierda, derecha, mirando hacia arriba, boca bajo, entre otras.

Después de configuración del acelerómetro, debería de configurarse la brújula, este punto es importante para establecer la ubicación del vehículo en el espacio. Al igual que la configuración anterior el sistema pidió que se rotara el conjunto de brújula y GPS, una vez realizado esta solicitud el sistema envía un mensaje de desconectar la FC. Al volver a conectar el Pixhawk, en la interfaz de Mission Planner se muestra la ubicación exacta de donde se encuentra el vehículo.

Para la configuración del control del control remoto, es a través de la opción radio calibration (calibración del radio), al dar clic en el botón calibrate radio, se desplazaron las perillas del mando radio control, en el movimiento roll, pitch, yaw y throttle. Una vez ubicados los movimientos, así como los valores mínimos y máximos, nos envió un resumen de los valores actualizados ya registrados. Las configuraciones adicionales, programar los modos de vuelo, que pueden ser estabilizados, Loiter, RTL (Return-to-Launch), Alt Hold, Auto, entre otros.

El sistema de aspersión representa la adición al prototipo. Por medio del control realizado por el operador a través del canal 5, ingresa la petición a la controlado en el SERVO10_FUNCTION (se activa para interpretar HIGH o LOW) para el se procesa la salida en señal PWM, que es transmitida a través del pin de señal aux 2 a la placa Arduino nano.

La señal PWM se recibe en la constante pwmPin en el puerto PWM D9 del Arduino nano, esta señal se inicializa como entrada, mientras que el relevador utiliza el pin D8 y el LED el pin D7 como señal de salida. En el cuerpo del programa se lee el valor recibido desde la FC al Arduino y se imprime el valor.



En función condicional (if), se evalúa si el valor recibido es menor a 1500 pone en bajo el relevador y el LED, en caso contrario activa el relevador y el LED, después de una pausa de 100 milisegundos, el sistema vuelve a continuar el bucle.

RESULTADOS

Durante la etapa de pruebas se realizaron diversos vuelos para evaluar el comportamiento del prototipo. La tabla 2, concentra las pruebas del prototipo, estas evidencias permitieron conocer y evaluar las variables de consumo de energético, respuesta de sensores y del sistema aspersor. Los resultados muestran los valores promedios obtenidos de las pruebas de vuelos, en las diversas fechas, se observa que las primeras etapas, los vuelo eran de corto alcance, el consumo energético no presentaba alteraciones drásticas y los avances eran inestables provocaron desplomes o aterrizajes accidentados. En la columna de las observaciones se presentan los errores que conllevaron a las modificaciones y mejoras del prototipo, sin embargo, debido a los problemas mencionados, fue necesario reemplazar diversos componentes a lo largo del proceso de pruebas, lo que impactaba en los lapsos de ensayos.

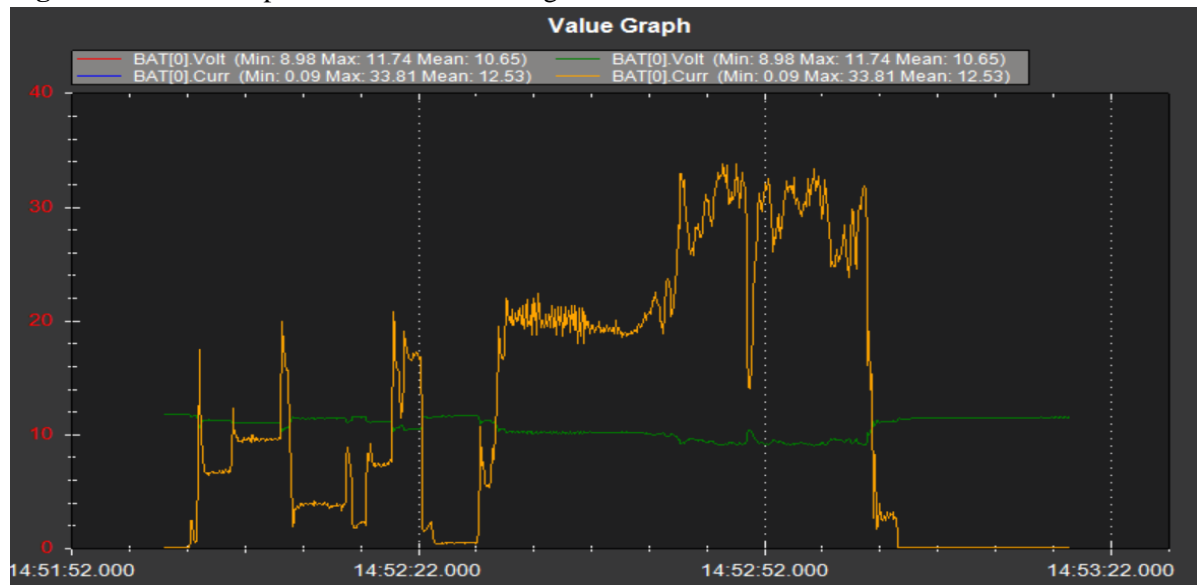
Tabla 2. Evaluación de pruebas.

Fecha	Número de pruebas	Tiempo promedio	Consumo energético promedio	Altura promedio	Avance promedio (m)	Observación
17/08/2023	7	1 min 30 s	Voltaje 11.49 V Corriente 3.08 A	1 m 50 cm	3	Problemas de control y calibración
21/11/2023	8	2 min	Voltaje 11.55 V Corriente 1.34 A	2 m	4	Problemas de ajuste de sensores.
29/11/2023	4	2 min	Voltaje 11.42 V Corriente 3.25 A	2 m	4	Problemas con vinculación de emisora y transmisora de mando de control.
19/02/2024	8	2 min	Voltaje 10.65 V Corriente 12.53 A	2 m	2	Se adiciono el sistema de aspersor dando un peso total de 2.7 k.

La gráfica de la figura 4, muestra el desempeño del prototipo durante la etapa de pruebas con la fecha 19/02/2024. Después de aplicar pruebas control, se adiciono el sistema aspersor al prototipo, teniendo como respuesta 3 vuelos con promedio de altura 2 metros, avance en trayectoria recta de 2 metros en promedio. La corriente solicitada en las etapas de mayor elevación oscilaron entre 12.53 A, y una caída de tensión promedio de 10.65 V, estos análisis permitieron conocer las demandas sustanciales al adicionar todos los compontes del sistema espesor. En cuanto a la respuesta de dicho sistema estando

en piso, vació el líquido del contenedor en 1 min 30 s, sin embargo, el prototipo con la adición de líquido, perdió empuje impidiendo el vuelo. Después del análisis en pruebas de laboratorio se concluyó en la adquisición de una batería que suministrara mayor voltaje solicitado por los motores.

Figura 4. Gráfico de prueba de vuelo con carga útil.



En la figura 5, se muestra el avance dron con el sistema aspersor. El peso total del prototipo fue de 2 kilos 700 g. Se observó una elevación de 5 metros de altura y se obtuvo un avance de 2 metros. El recorrido se realizó en un tiempo de vuelo 1 minuto y 30 segundos en un vuelo estabilizado.

En la gráfica del lado izquierdo, se percibe la relación del consumo con el voltaje y tiempo del prototipo durante esta etapa de pruebas. Se aprecia que el voltaje se mantiene constante toda la etapa de vuelo, con ligeras caídas de tensión en la etapa más crítica de consumo de corriente, que corresponden entre la hora 13:29:59 a 13:40:29, que asociados a los momentos de elevación y desplazamientos de la aeronave. En el mismo periodo se observa un incremento del consumo de corriente alcanzando en su pico más alto 34.3 A, esto ocurre durante el cambio de modo de vuelo. En la figura 6, se aprecia el vuelo realizado por el prototipo en su fase de pruebas.

Figura 5. Comportamiento del prototipo en prueba de vuelo con sistema aspersor.



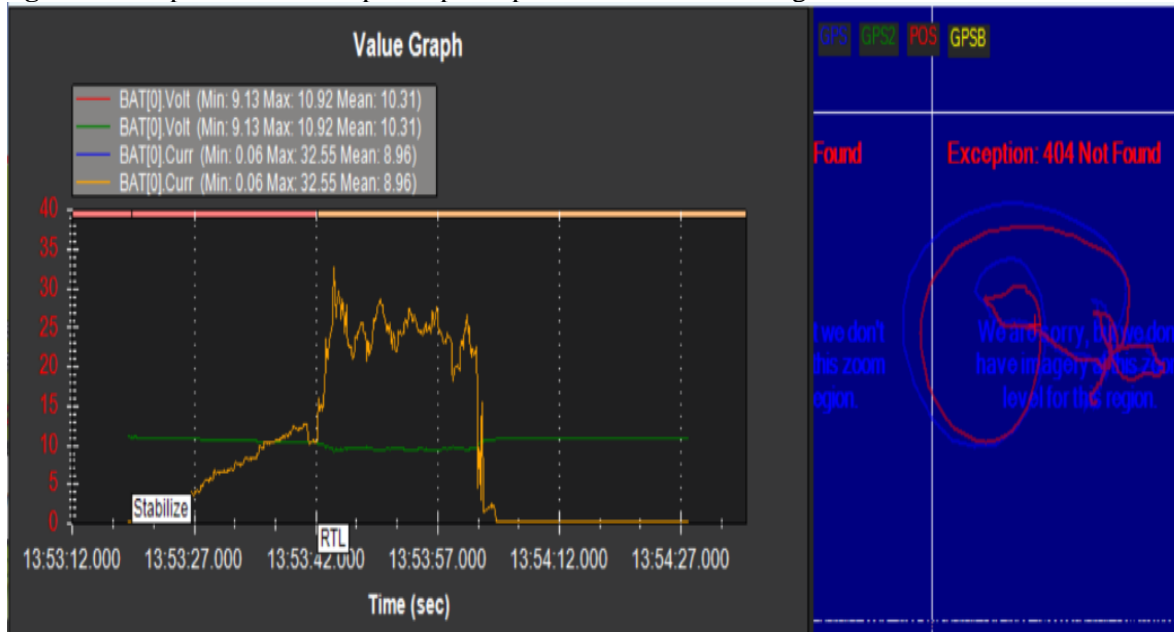
Figura 6. Prueba de vuelo.



La gráfica de la figura 7, de la prueba de vuelo adicionando una carga de 200 mililitros de sustancia, e aprecia el comportamiento del dron con carga útil. Durante el vuelo que tuvo una duración de 49 segundos, con avance, maniobras y aterrizaje estabilizado. Se puede observar que al igual que el vuelo sin carga adicional, se observa una disminución de voltaje en los momentos que el prototipo cambia al modo de vuelo loiter, mientras que en ese mismo modo el consumo de corriente se incrementa. En la figura también se aprecia el mapa del recorrido realizado, con una altura de 3 metros, 3 metros de avance, dos acrobacias de giros. Aunque los tiempos de pruebas fueron cortos el comportamiento es similar al vuelo sin carga adicional.

En esta prueba se activó el sistema de aspersión, ambas boquillas, drenaron el líquido a los 10 segundos, cubriendo un espacio de 1 metro y 25 cm en línea recta.

Figura 7 Comportamiento del prototipo en prueba de vuelo con carga útil.



CONCLUSIONES

Este trabajo se realizó con la finalidad de diseñar y ensamblar un prototipo de VANT multirroto del tipo cuadricóptero para las tareas de aspersión líquida de productos químicos y ser accesible para los campesinos guerrerenses. Este proyecto tomo como referencia VANT comerciales orientados para grandes producciones agrícolas, buscando replicarlo en una versión más reducida para disminuir precios y permitir su aplicación en jardines decorativos de casas, en producciones de invernadero o producciones de subsistencia.

Para este proyecto se tomó como referencia la metodología scrum, ya que facilito cambios durante el proceso de construcción sin afectar el avance entre faces. El desarrollo del prototipo VANT tipo cuadricóptero, baso su diseño y ensamble en las configuraciones de tipo X4, se realizó una investigación de los componentes básicos necesarios para el funcionamiento de este tipo de vehículos.

El sistema aspersor baso su funcionamiento en señales PWM, generadas por la controladora pero manipuladas por el operador del control remoto. Esto representa una alternativa de desarrollo económica y diferente de las realizadas por controladoras de vuelos comerciales. La utilización y lectura

del PWM para el control de una bomba, proporciona la alternativa económica de desarrollo de drones que convienen diferentes tipos de microcontroladores económicos.

En conclusión las pruebas de vuelo permitieron comprobar que el prototipo desarrollado presenta la capacidad para transportar una carga de más de 800 g correspondiente al sistema aspersor, más los 200 mm de agua incorporado, realizar la ejecución de asperjase en menos un minuto y presentar estabilidad, así como resistencia. No obstante, es importante mencionar que la combinación de tecnologías económicas permitió desarrollar un prototipo que se puede aplicar no solo al sector agrícola y horticultura por su tamaño compacto. A pesar de su tamaño es capaz de transportar una carga adicional, lo que conlleva a posibilitar adaptaciones para su aplicabilidad en aplicaciones de semillas o químicos sólidos.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento al CONAHCYT por el apoyo brindado para poder realizar esta investigación. También a la Universidad Autónoma de Guerrero, por esta oportunidad de llevar a cabo la Maestría para la Ingeniería en Innovación y Desarrollo Tecnológico. Así mismo a todos los implicados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ardupilot (2024). Mission Planner Overview. Recuperado 6 de mayo de 2024, de

<https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>.

Boletín (2022). Proponen desde el Congreso explotar el potencial agrícola de Guerrero, mediante la transformación y la comercialización. Congreso del Estado de Guerrero | LXIII Legislatura.

<https://congresogro.gob.mx/63/inicio/2022/10/06/proponen-desde-el-congreso-explotar-el-potencial-agricola-de-guerrero-mediante-la-transformacion-y-la-comercializacion/>

Barría O., Homero y Villarroel T., Dagoberto (2021). Uso de drones en el manejo de riego en praderas [en línea]. Osorno: Informativo INIA Remehue. N° 272. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/67613> (Consultado: 17 julio 2024).

CIMMYT (2023). Con drones impulsan la agricultura sustentable en Iguala.

<https://www.cimmyt.org/es/noticias/con-drones-impulsan-la-agricultura-sustentable-en-iguala/>



- Communications. (2023). ¿Qué es la agricultura de precisión? La gestión digital del campo. BBVA. Recuperado el 17 de julio de 2024, de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-agricultura-de-precision-la-gestion-digital-del-campo/>
- Espitia, Y. F. & Santiago, S. (2022). Diseño conceptual y preliminar de un UAV fumigador para cultivos de papa en Úmbita – Boyacá. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11371/4898>.
- Fernández Bobadilla, Héctor Alberto. (2016). “Diseño, construcción y control de una aeronave tipo dron”. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000745502>.
- Fernández, F. C. (2017). Diseño y construcción de un dron para el seguimiento de un objeto de forma autónoma mediante visión artificial. Tesis para obtener el título de Ingeniería Electrónica de Comunicaciones. Universidad de Alcalá. Escuela Politécnica Superior. Repositorio Institucional. Recuperado de: <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/32638>.
- García Benítez, J., Cuerno Rejado, C., & Gómez-Blanco, R. (2016). Conceptual design of a nonplanar wing airliner. Aircraft engineering, 88(4), 561-571. <https://doi.org/10.1108/aeat-11-2014-0204>
- Gobierno del Estado de Guerrero (2023). Presentan resultados del Censo Agropecuario 2022 sobre el Estado de Guerrero. Recuperado el 17 de julio de 2024, de <https://www.guerrero.gob.mx/2023/12/presentan-resultados-del-censo-agropecuario-2022-sobre-el-estado-de-guerrero/>
- Hanif, A. S., Han, X., & Yu, S. H. (2022). Independent control spraying system for UAV-based precise variable sprayer: A review. Drones, 6(12), 383.
- INEGI. (2020). Cuentame. Información por entidad. Guerrero. INEGI. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/gro/default.aspx?tema=me&e=12>
- Inglés Gimeno, R. (2021). Modificación de dron para entrega de paquetería. Tesis para obtener el grado de maestro en Ingeniería Industrial. Universitat Politècnica de Catalunya. Repositorio institucional. URL: <http://hdl.handle.net/2117/358770>
- Kilby, Terry & Kilby Belinda (2015). Getting Started with Drones. Publicado por: Make: Community.
- López Vicente, E. J. (2021). Diseño y construcción de un dron rociador de fertilizantes y pesticidas con capacidad útil de carga de 5 kg y autonomía de vuelo mínima de 8 minutos (Identificador:

- UDCTFM;15T00748). Editorial Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Recuperado de <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/15090>.
- Martínez Abril, C. (2019). Diseño y desarrollo de un prototipo físico de dron cuadricóptero. Tesis para obtener el título de Ingeniería en Tecnologías Industriales. Universidad Politécnica de Valencia. Repositorio Institucional. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10251/126033>.
- Meléndez Cano, D. (2017). Hacking con drones: Love is in the air. Madrid, España: Editorial 0xWord. (ISBN: 978-697-2348-7).
- SADER (2019). Manual para el Buen Uso y Manejo de Plaguicidas en Campo. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Recuperado de <http://www.gob.mx/senasica/documentos/manual-para-el-buen-uso-y-manejo-de-plaguicidas-en-campo?state=published>
- Torrente Artero, Óscar (2013). Arduino. Curso práctico de formación. Editorial: Alfaomega. Pag. 62 – 73.
- Ríos, G. A. B., Urrea, G., & Navia, J. A. N. (2020). Propuesta para la aplicación de métodos ágiles en el diseño conceptual de un dron. Ciencia y Poder Aéreo, 15(2), 110-121. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.671>
- Ozkan, E. (2024). Drones for Spraying Pesticides—Opportunities and Challenges. The Ohio State University: Columbus, OH, USA, 1-16.