
Diseño Conceptual y Preliminar de un UAV Fumigador para Cultivos de Papa en Úmbita – Boyacá



Presentado por
Yeison Ferney Espitia Romero
Stivent Alfonso Santiago Montaña

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Bogotá D.C, Colombia

2021

**Diseño Conceptual y Preliminar de un UAV
Fumigador para Cultivos de Papa
en Úmbita – Boyacá**

Presentado por

Yeison Ferney Espitia Romero

Stivent Alfonso Santiago Montaña

título de

Ingeniero Aeronáutico

Dirigida por

Didier Aldana Rodríguez

Codirector

Juan Pablo Rubio Ospina

Presentada a

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Fundación Universitaria Los Libertadores

Bogotá D.C, Colombia.

2021

Notas de aceptación



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá DC, noviembre de 2021.



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores y a los resultados de su trabajo.

Dedicatoria



A nuestros padres, gracias por apoyarnos en cada paso.

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Agradecimientos

Deseamos agradecer en primer lugar a Dios por habernos permitido realizar este proyecto, por darnos el conocimiento necesario y ayudarnos en cada momento para la realización exitosa del mismo. También, expresar nuestra gratitud a todo el equipo de docentes de la Fundación Universitaria los Libertadores, quienes fueron una valiosa guía a lo largo de este proceso, nos enseñaron, orientaron, apoyaron, ayudaron y alentaron siempre nuestro proceso de aprendizaje. Además, por haber creído en nuestras capacidades para formarnos como profesionales. Por último, nos gustaría agradecer a los miembros de nuestras familias por su comprensión y apoyo incondicional durante todo nuestro proceso formativo.

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Índice General

Capítulo 1 Introduccin	16
Capítulo 2 Planteamiento del Problema	18
2.1. Objetivos	19
2.1.1. Objetivo General.....	19
2.1.2. Objetivos Específicos.....	19
2.1.3. Justificación	19
Capítulo 3 Marco Teórico	20
3.1. Caracterización de las Plagas	21
3.1.1 Descripción de las plagas.....	23
3.1.2 Descripción de enfermedades	27
3.2. Productos Fitosanitarios	29
3.3. Métodos de Fumigación Tradicionales.....	31
3.3.1. Clasificación métodos de fumigación.....	31
3.5. Vehículos Aéreos no Tripulados.....	35
3.6. Historia de los UAV y su Desarrollo.....	35
3.7. Importancia de los UAV's.....	36
3.8. UAV's en la Industria Agrícola	37
3.9. Aplicaciones Agrícolas Para los UAV's.....	38
3.9.1. Evaluación de cultivos.....	38
3.9.2. Seguimiento de enfermedades.....	39
3.9.3. Pulverización de pesticidas y fertilizantes en cultivos	39
Capítulo 4 Metodología y resultados	41
4.1. Proceso de Diseño.....	41
4.2. Línea Base: UAV's de Fumigación.....	44
4.3. Selección del Modelo UAV	53
4.4. Selección de Componentes de Fumigación	53
4.5. Estimación de Peso	55
4.6. Motores	57
4.7. Hélices	58
4.8. Controlador de velocidad (ESC).....	59
4.9. Batería	60
4.10. Estimación de peso con componentes de propulsión.....	62
4.11. Diseño de Brazos.....	63

4.11.1. Material brazos.....	65
4.11.2. Estructura y Momento Flector	66
4.11.3. Distribución de tensiones normales debido al momento flector	68
4.11.4. Tensión cortante máxima.....	70
4.11.5. Deflexión del brazo	71
4.12. Cálculo Del Empuje De Los Motores	72
4.14. Cálculo del Tiempo de Vuelo y Distancia recorrida.	74
4.15. Simulación Software Xcalc Copter	75
4.16. Diseño en SolidWorks.....	78
4.16.1. Selección de tanque para carga paga	78
4.16.2. Diseño en SolidWorks del UAV	78
4.17. Análisis Estático De La Estructura Del UAV En SolidWorks	83
4.17.1. Preparando el esqueleto del UAV para la simulación	83
4.17.2. Los resultados del análisis	87
4.18. Simulación de Mission Planeer	89
4.18.1. Delimitación del punto de partida	89
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones.....	93
Bibliografía	96
Apéndice A Primer Apéndice	¡Error! Marcador no definido.

Índice de figuras

Figura 1. Áreas cultivadas, producción y rendimiento de papa en el año 2015	20
Figura 2. Presencias de plagas en cultivos de papa en los principales departamentos productores.	22
Figura 3. Ciclo de vida de insecto por estado de larva.	23
Figura 4. Ciclo de vida de insecto con metamorfosis sencilla.	24
Figura 5. Polilla guatemalteca y ciclo de producción.	24
Figura 6. Gusano blanco y daños ocasionados	24
Figura 7. Tiroteador y daños ocasionados en cultivos de papa.	25
Figura 8. Babosa y daños ocasionados en cultivos de papa.	25
Figura 9. Chiza y daños ocasionados en cultivos de papa.....	26
Figura 10. pulguilla y daños ocasionados en cultivos de papa.	26
Figura 11. pulguilla y daños ocasionados en cultivos de papa.	26
Figura 12. Tiroteo y daños ocasionados en cultivos de papa.	27
Figura 13. Planta afectada por pulgones en cultivos de papa.	27
Figura 14. Daños ocasionados por Tizón Tardío cultivos de papa.....	28
Figura 15. Daños ocasionados por Rhizoctonia en cultivos de papa.....	28
Figura 16. planta infectada por virus (PYVV) en cultivos de papa.....	29
Figura 17. planta infectada por virus (PLRV) en cultivos de papa.	29
Figura 18. Clasificación de plaguicidas según el grado de toxicidad.....	30
Figura 19. Fumigadora manual.....	32
Figura 20. Fumigadora estacionaria 160-ES30.....	32
Figura 21. fumigadora estacionaria en funcionamiento	33
Figura 22. NDVI y sanidad vegetal.	38
Figura 23. ilustración de un dron rociando cultivos en una región de la granja donde los tractores e incluso los rociadores humanos pueden no llegar debido a la densidad del cultivo.	40
Figura 24. Diagrama de bloque del funcionamiento del UAV	42
Figura 25. Hexa-copter	53
Figura 26. Visualización del motor físico y sus medidas.....	57
Figura 27. Visualización física de la hélice prospecta.	58
Figura 28. Visualización de el ESC comercial Flame 180A 12S V2.0.	60
Figura 29. Batería DJI T16 AB3	61
Figura 30. Configuración del UAV y medidas de los brazos, hélices y entre hélices.	64
Figura 31. Referencia de la configuración del UAV	64

Figura 32. Geometría de un hexágono.....	65
Figura 33. Representación gráfica de momento flector en el brazo del UAV.	66
Figura 34. Reacciones generadas por empuje del motor.....	67
Figura 35. Diagrama de fletores.....	68
Figura 36. Distribución de tensiones.	70
Figura 37. Datos de simulación XcopterCalc	76
Figura 38. Gráfico datos de simulación XcopterCalc estimador de alcance	77
Figura 39. Gráfico de simulación XcopterCalc características del motor	77
Figura 40. Diseño aproximado en SolidWorks del tanque de 20L.....	78
Figura 41. Diseño en SolidWorks del UAV fumigador.	79
Figura 42. Propiedades del aluminio aeroespacial 6061-T6	79
Figura 43. Propiedades físicas del diseño en SolidWorks.....	80
Figura 44. Planta del modelo y vista trimétrica y en SolidWorks	81
Figura 45. Vista preliminar de la estructura y diseño visual del drone	82
Figura 46. Vista de motores y bombas de presión	82
Figura 47 Posicionamiento de las cargas..	84
Figura 48. Menú de parametrización de fuerzas en SolidWorks.....	84
Figura 49. Visualización de la fuerza aplicada en las placas centrales de la estructura del UAV	85
Figura 50. Visualización de la fuerza aplicada en la placa sujetadora del motor	85
Figura 51. Cuadro de Opción de mallado y ejecutar el análisis en SolidWorks.....	86
Figura 52. Visualización del mallado en SolidWorks de la estructura del UAV	87
Figura53. Simulación en SolidWorks de la estructura en tenciones de Von Mises.....	88
Figura 54. Simulación en SolidWorks de la estructura de los desplazamientos por análisis estático	88
Figura 55. Simulación en SolidWorks de la estructura del UAV con respecto a las deformaciones	88
Figura 56. Mapa de la zona escogida para el ejemplo de la planificación de la misión	90
Figura 57. Recorrido de fumigación.	90
Figura 58. Establecimiento del enmallado con la velocidad	91
Figura 59. Proceso de fumigación.	92

Índice de tablas

Tabla 1. Principales plagas que afectan el cultivo de la papa en Colombia	21
Tabla 2. Principales enfermedades de cultivo de papa en Colombia	22
Tabla 3. Variedades de papa de mayor importancia en la región de Boyacá.	33
Tabla 4. Línea base de UAV's especializados en agricultura de precisión con pulverización.	44
Tabla 5. Componentes para fumigación ideales y sus características	54
Tabla 6. Componentes, unidades y peso en Kg de cada uno.....	55
Tabla 7. Ficha técnica y datos de los motores prospectos.....	57
Tabla 8. Carga de datos de prueba del motor.....	58
Tabla 9. Ficha técnica y datos de la hélice prospecto.	58
Tabla 10. Ficha técnica del ESC Flame 180ª 12S V2.0 prospecto.	60
Tabla 11. Datos tomados de las especificaciones de cada componente para el calculo del número de celdas de la batería:.....	60
Tabla 12. Características de la batería DJI T16 AB3	62
Tabla 13. Componentes, unidades, peso de cada uno en Kg.....	62

Abreviaturas

UAV Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo Aéreo no Tripulado)

CAD Computer Aided Design (Diseño asistido por computadora)

AP Agricultura de Precisión

EPP Elementos de protección Personal

FPV First person view (Vista de primera persona)

Diseño conceptual y preliminar de un UAV fumigador para cultivos de papa

Resumen

Colombia posee tres sectores económicos que son el soporte primordial del desarrollo del país. Sector primario, sector secundario y sector terciario. Para fines de este trabajo de grado se enfocará en el sector primario, siendo la agricultura la principal actividad que se desarrolla dentro de este sector conformado por un 6% de la producción económica del país. Por ello, la aplicación de pesticidas y fungicidas en áreas agrícolas es de primordial importancia para el rendimiento y producción de los cultivos. Numerosos agricultores continúan utilizando métodos tradicionales de fumigación, utilizando fumigadora de espalda, las cuales puede ser manual o motor y la fumigadora estacionaria (motor) como herramienta de cuidado de las plantaciones de cultivos de papa. El cual unos de los aspectos que más inconvenientes le producen al momento de realizar la fumigación en el cultivo es el tiempo de demora en dicho proceso y contacto con el producto fitosanitario, provocando enfermedades por toxicidad y envenenamiento por contacto con productos fitosanitarios a corto o largo plazo.

El principal aporte expuesto en este trabajo de investigación consiste en el diseño conceptual y preliminar de un UAV multirrotor para fumigación de cultivos de papa, equipado con un sistema de pulverización automatizado capaz de sobrevolar y fumigar áreas de cultivos de papa en general en la ciudad de Úmbita - Boyacá. Se diseñó un UAV fumigador aéreo no tripulado con configuración de hexacoptero, carga útil de 20 kg; una tasa de pulverización de 3.6 litros por minuto; una franja de pulverización de 5-6 metros y 15 minutos de tiempo de vuelo. Para el diseño se realizó un análisis de los requerimientos primordiales que requiere este tipo de sistemas de pulverización. Primordialmente se seleccionó los componentes de pulverización, luego, con respecto al peso de la carga útil y los componentes de pulverización, se seleccionó los componentes de propulsión. Posteriormente, se calculó el requerimiento de empuje, velocidad horizontal, velocidad vertical, tiempo de vuelo y finalmente, se diseña la estructura del multirrotor determinando la longitud de los brazos y la aplicación de la carga útil.

El diseño del pulverizador fue asistido por computadora o CAD por sus siglas en ingles computer-aided design. El aluminio aeroespacial de grado 6061-T6 fue una elección natural para el marco estructural junto con los brazos pagables. El diseño se simulo en el software XCalc Copter para validar si se hizo una correcta elección de los componentes de propulsión. Esto nos permitió crear rápidamente un prototipo del pulverizador, obteniendo un hexacoptero pulverizador de 48 kg de peso, incluida la carga útil de 20 kg. El pulverizador puede generar un empuje total de 480 N, lo que proporciona una relación de empuje y peso de 2.0. El sistema de pulverización consta de 4 bombas y 8 boquillas ubicado en los brazos (1, 2, 4, 5) conformado por 2 boquillas ubicadas en cada brazo a 50 cm entre sí.

Finalmente, teniendo en cuenta las características seleccionadas en la línea base para UAV y los cálculos efectuados. Se obtuvo una autonomía de vuelo de 15 minutos con motores al 75% de operación y con una batería de 18000 mA/hora, lo cual permite el recorrido de los 130m² (metros cuadrados) del área propuesta. La simulación en el programa XCalc Copter ayudó a demostrar la factibilidad del diseño del UAV y ayudó a contrastar los datos calculados de forma teórica para conseguir el factor de diseño equilibrado que facilitó la validación del desempeño. Permitiendo maximizar el rango de fumigación para el cultivo de papa y permitiendo minimizar los tiempos de fumigación, así como disminuir la carga laboral y el contacto directo con los productos fitosanitarios.

Palabras claves: UAV, agricultura, papa, pulverización, fumigación, fitosanitario

Capítulo 1

Introducción

Colombia es un país favorecido debido a la ubicación geográfica en la que se encuentra, presentando grandes capacidades climáticas y de suelos para el desarrollo de la agricultura y cultivo de tubérculos, en especial la papa. La papa (*Solanum tuberosum*) es un alimento básico importante, perteneciente a la familia solanáceas de plantas con flores y es el tercer cultivo a nivel mundial más importante como producto alimenticio después del trigo y el arroz. Alrededor de 110.000 familias se encuentran vinculadas con la explotación directa de este cultivo y en él se generan más de 300.000 empleos. Según ministerio de agricultura y desarrollo rural (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015), la zona óptima de producción se concentran entre 2000 y 3500 msnm (metros sobre el nivel del mar), en donde se encuentran los principales departamentos con mayor productividad en cultivos de papa como lo son Cundinamarca, Boyacá, Nariño, Antioquia, y Santander; con un área sembrada del 94%. Las variedades más sembradas en estos cinco departamentos son: Pastusa superior, Parda pastusa, Rubí, Ica-única, Diacol Capiro (R-12), Tucarreñe y criolla. El 90% de la producción de estas variedades se destina a consumo en fresco y el 10% a procesamiento industrial (Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales, 2020).

En la agricultura, la fumigación de plaguicidas es de suma importancia para la producción y control de cultivos. La producción de papa está asociada con uso de productos fitosanitarios como plaguicidas el cual se clasifica en insecticidas, herbicidas y fungicidas para controlar plagas y optimizar los beneficios para el agricultor. Uno de los aspectos más inconvenientes que se produce al momento de realizar la fumigación en el cultivo son los tiempos de demora en dicho proceso y contacto con el producto fitosanitario. Numerosos agricultores continúan utilizando métodos tradicionales de fumigación, como fumigadora de espalda, las cuales puede ser manual o de motor y la fumigadora estacionaria (motor) como herramienta de cuidado de las plantaciones de cultivos de papa.

La propuesta del diseño de un UAV fumigador como idea alternativa para ayudar al proceso de fumigación de insectos y enfermedades en los cultivos de papa, está motivada principalmente en el hecho de la protección a la salud de los agricultores, la optimización y eficacia del fumigado de grandes campos de cultivos (inicialmente de papa), la reducción de carga laboral para los cultivadores y por último y no menos importante, la introducción de las nuevas tecnologías en el agro colombiano que ayuden a su desarrollo y producción.

La sostenibilidad del cultivo de papa en Colombia es un motivo de preocupación, ya que el aumento de los insumos está provocando situaciones adversas del uso excesivo de plaguicidas. Estas consecuencias incluyen problemas de salud, contaminación del suelo y agua, aumento de la resistencia en las poblaciones de plagas y muerte de insectos beneficiosos. Además de los impactos negativos para la salud y el medio ambiente, el uso de plaguicidas genera un costo económico significativo para los productores. Los gastos en plaguicidas generalmente comprenden entre el 35% del costo de producción (Pinzón, 2019), por lo que se expresa en un derroche y mal empleo del material fitosanitario con la utilización de los métodos tradicionales.

Para el diseño se realizó un análisis de diferentes UAV's hallados en el mercado comercial, expuestos en la sección línea base, los cuales presentan el sistema de pulverización y almacenamiento de material fitosanitario, con lo cual se estipuló la configuración óptima para el uso en cultivos de papa y su respectiva fumigación de las plantas, consiguiendo un producto que permita maximizar el rango de fumigación para el cultivo y permita minimizar los tiempos, así como disminuir la carga laboral a los agricultores encargados de la producción y cuidado de dichos cultivos. Como parte de la metodología se realizó el diseño CAD del UAV con el sistema de pulverizado y la simulación en XCal Copter dentro de los parámetros establecidos según línea base y cálculos basados en fundamentación teórica, con el fin de avalar las características que debe poseer el UAV para que realice la misión deseada (Fumigación de cultivos de papa) cumpliendo los objetivos propuestos.

Finalmente se concluyó con la investigación, los cálculos y la simulación, que es posible integrar esta tecnologías; demostrando que el UAV es capaz de soportar el peso del sistema de pulverización y tanque de almacenado para el producto fitosanitario con carga paga de 20L sin afectar su vuelo, comprobando que es posible utilizar esta tecnología en los cultivos de papa en la región Úmbita - Boyacá.

Capítulo 2

Planteamiento del Problema

Hoy día, para el agricultor uno de los aspectos que más inconvenientes le producen al momento de realizar la fumigación en el cultivo es el tiempo de demora en dicho proceso y contacto con el producto fitosanitario. Numerosos agricultores continúan utilizando métodos tradicionales de fumigación, utilizando fumigadora de espalda, las cuales puede ser manual o motor y la fumigadora estacionaria (motor) como herramienta de cuidado de las plantaciones de cultivos de papa. Estos métodos provocan enfermedades por toxicidad y envenenamiento por contacto con productos fitosanitarios a corto o largo plazo. Según (Bejarano, 2012), Los efectos negativos más comunes por estas sustancias son dolor de cabeza, náuseas, vómitos, dolor de estómago y diarrea. Además, la fuerza de estos efectos sobre la salud depende del tipo de plaguicida y su toxicidad, exposición o dosis, frecuencia de aplicación y el uso de medidas de protección personal. Por ello, (Gómez G, Factores de riesgos ocupacionales a los cuales se encuentran expuestos los trabajadores informales de la agricultura en el municipio de Potosí, 2016) en una encuesta realizada en el 2011 en el municipio de Potosí; el 97% de los trabajadores del sector agrícola que manipulan plaguicidas que hace referencia a 62 personas, el 37,10% equivalente a 23 personas si cuentan con elementos de protección personal (EPP) al momento de la fumigación y el 62,90% equivalente a 39 personas no cuentan con la implementación de protección personal (EPP), en otros términos sólo cuentan con la protección disponible de acuerdo a sus recursos propios.

De acuerdo con lo anterior, los métodos de fumigación tradicionales que involucran el tiempo de demora del proceso de fumigación, graves daños para la salud de los agricultores y del medio ambiente. Nace este proyecto para dar una posible solución para ayudar a mitigar los efectos y favorecer a los agricultores en esta tarea, diseñando una aeronave no tripulada (UAV) para la fumigación aérea en cultivos de papa que permitan realizar tareas de fumigación sin involucrar la intervención del agricultor en la aplicación de elementos fitosanitarios y de igual forma disminuir la carga de trabajo para el agricultor, mejorando la eficiencia y tiempos de pulverización por hectáreas en las diferentes regiones del municipio de Úmbita-Boyacá.

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo General

Realizar el diseño conceptual y preliminar de un UAV multirrotor para fumigación de cultivos de papa en general en la ciudad de Úmbita - Boyacá.

2.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar plagas más comunes en los cultivos de papa y los procesos tradicionales de fumigación para mitigar los impactos de estas.
- Definir las características del UAV multirrotor y el sistema de fumigación de abordaje, que permitan determinar la autonomía y el rango necesario para fumigar un área hasta 130 metros cuadrados.
- Diseñar el UAV y el sistema de fumigado mediante el software SolidWorks.
- Simular el sistema diseñado y sus componentes mediante el software XCalc Copter para validar su desempeño y viabilidad.

2.1.3. Justificación

Actualmente la fumigación del cultivo de papa en el municipio de Úmbita - Boyacá se lleva a cabo a través de los métodos tradicionales como la fumigadora manual y la fumigadora estacionaria. La fumigación es frecuente para la prevención de plagas y purificación de los cultivos de papa, sea del área afectada lo cual tiene un inconveniente que es el desperdicio de líquido y las pérdidas causados por los brotes de plagas no controlados, además del tiempo excesivo que lleva realizar este proceso de forma tradicional y también el peligro que resulta para el operador en la manipulación y exposición a los fungicidas y pesticidas que suelen ser tóxicos. Por lo tanto, nuestra propuesta de investigación es el diseño conceptual y preliminar de un UAV que integre un sistema de fumigación aportando material de investigación para la agricultura en Colombia que permita realizar un análisis en tiempo real del cultivo para identificar plagas en áreas específicas. Además de ser un método tecnológico que permitiría la disminución de costos en la fumigación de cultivos de papa, aumentando la eficacia, y que reduce la manipulación y exposición a los pesticidas que puedan resultar nocivos para la salud del trabajador. El impacto ambiental sería la reducción y control de la cantidad de líquido de fumigación administrado para la planta en sus etapas de fumigado para evitar deteriorar el cultivo de papa, siendo resultante de pérdidas económicas para los agricultores.

Capítulo 3

Marco Teórico

Colombia es un país favorecido debido a la ubicación geográfica en la que se encuentra, como son las zonas de relieves altos especialmente en los departamentos como Boyacá y Cundinamarca, presentando grandes capacidades climáticas y de suelos para el desarrollo de la agricultura y cultivo de tubérculos, en especial de la papa, puesto que contribuyen con más del 60% de la producción nacional ((ICA), 2016). La zona optima de producción se concentran entre 2000 y 3500 msnm, en donde se encuentran los principales departamentos con mayor productividad en cultivos de papa con 94% de área sembrada como lo son: Cundinamarca con un 38,4% de toneladas de producción, Boyacá con un 28,8%, Nariño con un 18,3%, Antioquia con un 5,2%, Santander con 3,1% (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015) figura 1.

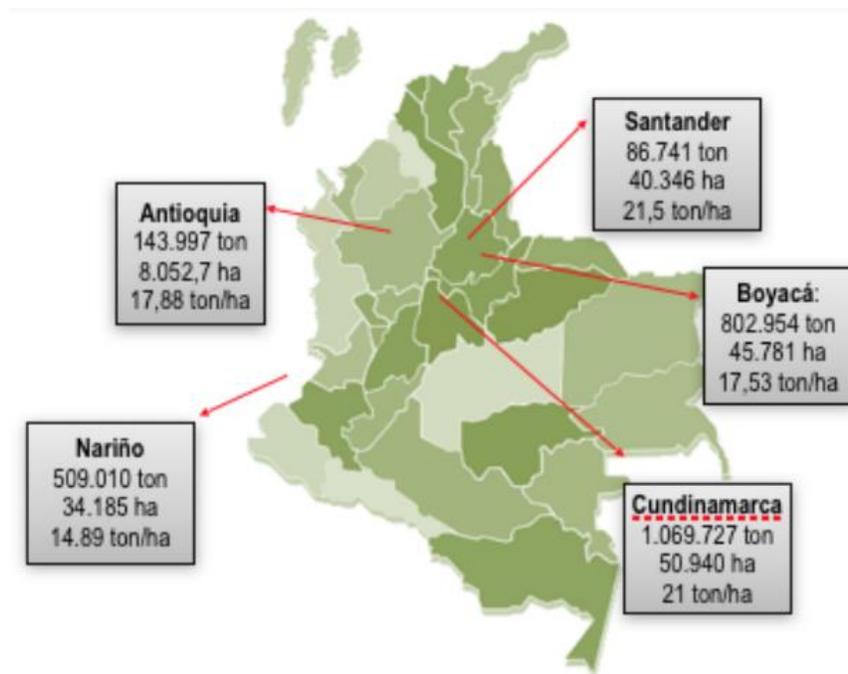


Figura 1. Áreas cultivadas, producción y rendimiento de papa en el año 2015 (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015, pág. 38)

3.1. Caracterización de las Plagas

La producción de papa en Colombia, en la provincia de Boyacá en el municipio de Úmbita ha presentado condiciones de plagas, debido al cambio climático. (Mery Esperanza Fernández, FONADE E IDEAM, 2013) Las anomalías climáticas involucradas en el cambio climático debido a la alteración del clima producen un impacto socioeconómico de gran magnitud en las regiones, donde la agricultura depende del régimen de lluvias y conductas de temperatura, por lo que se generan inundaciones y deslizamientos en tierras cultivadas, aparición de plagas y dilatación de enfermedades, distorsión en los ciclos vegetativos de los cultivos, cambios en los ciclos de plagas, mayor estacionalidad de la producción, pérdidas en la producción y rendimiento de cultivos, importación de productos agrícolas y amenaza a la seguridad alimentaria entre otros; que no han sido favorables para dichos cultivos de papa, por lo que se deben considerar diferentes medidas para optimizar la mano de obra y utilizar insumos y estrategias eficaces para reducir riesgos de plagas en los cultivos de papa. Y mitigar el impacto negativo de las típicas condiciones ambientales adversas de la región que las generan. Siendo más precisos, los cultivos de papa se ven afectados por una variedad de organismos que pueden causar pérdidas económicas bajo ciertas condiciones como, días calurosos, alternancia entre días lluviosos y secos, campos infestados, suficiente humedad en el suelo y temperaturas entre 12 a 24°C, presencia de variedad susceptible, heridas en los tubérculos que favorecen la aparición de plagas. Los patógenos de la papa que afectan el rendimiento y la calidad de los cultivos, son insectos, hongos, bacterias, y virus (tablas 1 y 2) que pueden afectar hojas, tallos o tubérculos; impidiendo el crecimiento de las plantas y ocasionando la pudrición o deformidad en tubérculos que puede afectar la apariencia comercial y la calidad de cocción del tubérculo. Estas se clasifican a continuación (Bayona, 2013):

Tabla 1. Principales plagas que afectan el cultivo de la papa en Colombia (*Cámara de Comercio de Bogotá, 2015, pág. 20*)

Clasificación	Nombre común	Nombre Científico
Plagas de suelo/tubérculo	Chizas	Phylophaga obsoleta. Ancognata scarabaelodes- Clavipalpus ursinus
	Gusano blanco de la papa	Premnotrypes vorax
	Tiroteador	Naupactus sp
	Polilla pequeña o palomilla	Pthorimaca operculella
	Polilla Guatemalteca	Tecia solanivora
	Babosa	Milax gagates
	Nematodos	Meloidogyne sp. Globodera rostochiensis
Plagas de follaje y/o frutos	Polilla pequeña o palomilla	Pthorimaca operculella
	Pulguilla	Epitrix cucumeris
	Áfidos o pulgones	Myzus sp y Aphis sp
	Toston, mosco	Lyriomyza huidobrensis
	Trips	Frankiniella tuberosi-thrips palmi
	Mosca blanca	Trialeurodes vaporariorum
	Gusanos de follaje	Copitarsia consueta
	Trozadores	Agrotis ipsilon
Plagas de almacenamiento	Polilla pequeña o palomilla	Pthorimaca operculella
	Polilla guatemalteca	Tecia solanivora
	Áfidos	Rhopalosiphoninus latysiphon

Tabla 2. Principales enfermedades de cultivo de papa en Colombia (*Cámara de Comercio de Bogotá, 2015, pág. 21*)

<i>Nombre común</i>	<i>Agente causal</i>
Tizón tadio o Gota	Phytophthora infestans
Alternaria-tizón temprano	Alternaria solani
Rhizoctonia-costa negra	Rhizoctonia solani
Roya común	Puccinia pittieriana
Cinicilla o mildew polvoso	Erysiphe cichoracearum
Mortaja Blanca o palomillo	Rosellinia sp
Marchitez bacteriana	Ralstonia solanacearum
Pata negra	Erwinia carotovora
Virus del enrollamiento de las hojas (PLRV)	
Mop top (PMTV)	
Virus del amarillamiento de las venas (PYVV)	

Los cultivos de papa en Colombia se vieron afectados por plagas de interés económico. Las plagas tienden a afectar de forma contundente los tubérculos sanos como el virus de amarillamiento en las hojas de la planta de papa (PYVV) con un 36,1%, Mosca blanca con 16%, Polilla con 11,2%, Rhizoctonia con 6,6%, Roña con 5,1% y Gusano blanco con 1,6% (Instituto colombiano Agropecuario ICA, 2016) figura 2.



Figura 2. Presencias de plagas en cultivos de papa en los principales departamentos productores. (ICA, 2016)

3.1.1 Descripción de las plagas

Para entender el comportamiento de cada una de las plagas principales en cultivos de papa, se debe caracterizar y entender sus diferentes etapas de crecimiento y cómo estas afectan al cultivo. En general las etapas de crecimiento presentan dos situaciones:

Situación 1

larvas o gusanos: De acuerdo con la figura 3, es una etapa de desarrollo que a partir del huevo alcanza un estado inmaduro (sexualmente), después pasa a un estado intermedio de pupa (gusano cubierto por capa dura y oscura donde está en proceso de crecimiento) que posteriormente al madurar sexualmente llega a formar el adulto (como polillas o cucarrones) (Page Baluch, 2017).

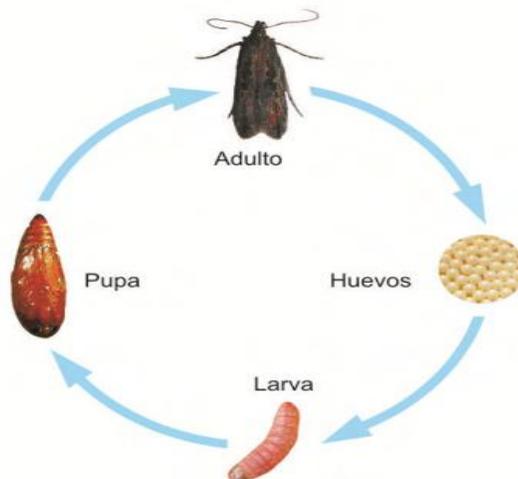


Figura 3. Ciclo de vida de insecto por estado de larva. (Agro Cabildo, 2017, pág. 3)

Situación 2

existen otros tipos de plagas que no se convierten en larvas, estos pasan de huevos a una etapa de estado inmaduro (semejante al adulto excepto en tamaño) y finalmente a adulto (figura 4).

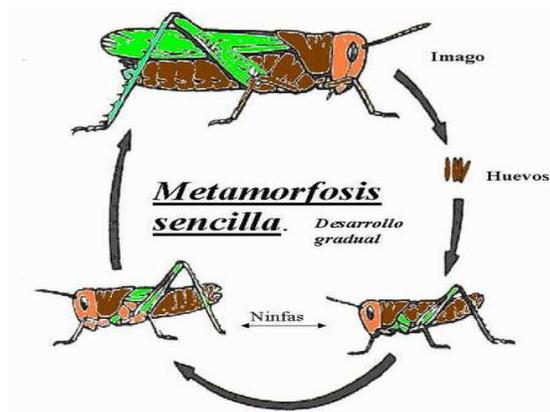


Figura 4. Ciclo de vida de insecto con metamorfosis sencilla. (Aguirre, 2019)

Polilla guatemalteca (*Tecia solanivora*): Principal plaga en cultivos de papa. Es una pequeña mariposa de color café oscuro a gris (Figura 5), su ámbito es nocturno y afecta solo los tubérculos. La hembra deposita entre 150-200 huevos en el suelo cerca de los tubérculos de papa (Agro Cabildo, 2017).



Figura 5. Polilla guatemalteca y ciclo de producción. (Agro Cabildo, 2017)

Gusano o larva (*prepnortypes vorax*): Son de color blanco cremoso, miden entre 11 a 14 mm de largo. Sus larvas perforan el tubérculo, formando túneles en donde depositan su excremento, dejando agujeros cuando abandonan el tubérculo (Figura 6).



Figura 6. Gusano blanco y daños ocasionados (Lifecrop, 2013)

Tiroteador (*naupactus* sp): Es un pequeño gorgojo que mide 8,4 mm de largo y 3,6 de ancho (Figura 7), se alimentan del follaje del tubérculo y pueden atacar indistintamente cualquier parte de la planta.



Figura 7. Tiroteador y daños ocasionados en cultivos de papa. (Fedepapa, 2010)

Babosa (*Milax gagates*): Las babosas son organismos fitófagos, su ámbito es nocturno y afecta raíces, follaje y tubérculos (Figura 8).



Figura 8. Babosa y daños ocasionados en cultivos de papa. (Instituto Colombiano Agropecuario, 2011)

Chizas (*Phylophaga obsoleta*, *Ancognata scarabaelodes*; *Clavipalpus ursinus*): Las larvas se alimentan de raíces, ocasionando daños en las plantas al interferir por la toma de nutrientes por las heridas ocasionadas. Los daños en los tubérculos son severos, ya que deterioran la superficie dejándolas con mal aspecto y disminuyendo el peso hasta un 50% en un tubérculo y la calidad del producto (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015) (figura 9).



Figura 9. Chiza y daños ocasionados en cultivos de papa. (ICA y Colaboradores, 2011)

Pulguilla (*Epitrix cucumeris*): Son cucarrones de color negro brillante (Figura 10). Se alimentan de las hojas ocasionando agujeros redondos de diferentes tamaños, retardando el crecimiento y destruyendo gran parte del área foliar sufriendo graves daños considerables en los cultivos.



Figura 10. pulguilla y daños ocasionados en cultivos de papa. (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015)

Trozador (*Agrotis ipsilon*): Son gusanos de hábito nocturno, alcanzan hasta 3,5 cm de longitud. se alimentan del tejido de los tallos dejándolos muy afectados y se alimentan de los tubérculos en los cuales deteriora la superficie dejando con mal aspecto y disminuyendo la calidad del producto (figura 11).



Figura 11. pulguilla y daños ocasionados en cultivos de papa. (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015)

Tostón o Minador (*Liriomyza huidobrensis*): es una mosca de color oscuro con puntos amarillos, cuyas hembras perforan las hojas para poder poner sus huevos, las larvas emergen y se alimentan de los tejidos realizando huecos en las hojas de la planta reduciendo la tasa fotosintética (figura 12).



Figura 12. Tiroteo y daños ocasionados en cultivos de papa. (Fedepapa, 2010)

Pulgones o Áfidos: Los pulgones son insectos pequeños de hasta 4 mm de longitud. El pulgón puede afectar directamente las plantas de papa, al alimentarse de la savia provocando deformación, enrollamiento en las hojas (figura 13).



Figura 13. Planta afectada por pulgones en cultivos de papa. (F. Montesdeoca, 2013)

3.1.2 Descripción de enfermedades

Tizón tardío o Gota (*Phytophthora infestans*): El tizón es sin duda la enfermedad que más seriamente afecta al cultivo de papa en el país. Afectando en cualquier etapa del cultivo que implica las hojas, tallos aéreo y tubérculos (Figura 14). En hojas se inicia con pequeñas manchas de color verde claro, las cuales crecen rápidamente, tornándose de color café grisáceo. En los tallos aéreos se presenta lesiones irregulares de color café, rompiéndose fácilmente los tallos afectados. En los tubérculos, la enfermedad puede impedir el engrosamiento del tubérculo y lesiones oscuras irregulares (ICA y Colaboradores, 2011). El tizón se favorece en condiciones de alta precipitación y temperaturas que oscilan entre 15-25°C (Raffaele Vignola, 2017). Un cultivo sin protección puede ser destruido en semanas o menos, ocasionando grandes pérdidas económicas.



Figura 14. Daños ocasionados por Tizón Tardío cultivos de papa. (HeldForrans, 2015)

Rhizoctonia-Costra negra (*Rhizoctonia solani*): Esta enfermedad se favorece de suelos húmedos, se desarrolla a temperaturas de 16-18°C. Los ataques moderados de este hongo pueden inducir pérdidas de un 20% en los cultivos de papa (Figura 15).



Figura 15. Daños ocasionados por Rhizoctonia en cultivos de papa. (Cuervo, 2019)

Virus del amarillamiento de la vena (PVYV): Amarillamiento de las venas de la hoja de la papa causada por el PVYV, que obstruye los tejidos conductores, dificultando el paso de nutrientes produciendo el amarillamiento de las hojas, la pérdida de vigor de la planta, tubérculos deformes y afectando la disminución del tubérculo en la producción (Figura 16).



Figura 16. planta infectada por virus (PYVV) en cultivos de papa. (ICA y Colaboradores, 2011)

Virus del enrollamiento de las hojas (PLRV): El virus (PYVV) es transmitido por insectos principalmente el pulgón que puede reducir hasta un 80% en el rendimiento de la cosecha. Las plantas enfermas por el virus presentan enanismo, enrollamiento de las hojas basales, hojas pálidas y necrosis en red en los tubérculos (figura 17).



Figura 17. planta infectada por virus (PLRV) en cultivos de papa. (Revista de investigaciones Agropecuarias, 2017) .

3.2. Productos Fitosanitarios

El control de plagas y enfermedades para los cultivos de papa requiere de la fumigación de plaguicidas. los plaguicidas se clasifican según los organismos sobre el cual actúan, en este caso tenemos, insecticida, herbicida y fungicida, el cual son sustancias químicas para controlar, prevenir o destruir las diferentes plagas que afectan las plantaciones de papa. De acuerdo con lo anterior, los gastos en plaguicidas generalmente comprenden entre el 35% del costo para el sostenimiento de la producción (Andrés Valencia Pinzón (Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural) , 2019).

Insecticidas: los insecticidas es un compuesto químico utilizado para matar o controlar los diferentes insectos que atacan al cultivo tales como escarabajos, moscas, pulgones, saltamontes entre otros insectos.

Fungicidas: son sustancias tóxicas con un recubrimiento protector en las hojas o semillas que impide o retarda el crecimiento de hongos en los cultivos de papa, entre ellos se encuentran Tizón tardío o Gota, amarillamiento de la vena (PYVV) y enrollamiento de las hojas (PLRV) entre otros.

Herbicidas: los herbicidas son utilizados para eliminar o interrumpir el desarrollo de plantas indeseables. Se pueden aplicar en follaje como en suelo. La aplicación del herbicida en suelos generalmente afecta la germinación de la maleza y se denomina herbicidas residuales. Algunos herbicidas residuales tienen acción de contacto y afecta raíces y tallos en la medida que se emerge la semilla. En la aplicación en follaje afectando solo la parte tratada se denomina como herbicida de contacto, los herbicidas sistemáticos afectan a todo el conjunto de la planta, debido a que esta lo absorbe y transporta a otro órgano (raíz), eliminando por completo la mala hierba (Inostroza, Méndez, & Ríos, 2011).

Los plaguicidas deben ser tóxicos para las plagas que se quiera combatir y no tóxico para el resto de los seres vivos. Sin embargo, la mayoría de los plaguicidas son tóxicos en algunos seres vivos incluido el hombre. El riesgo a daños o afectaciones en la salud depende del grado de toxicidad y exposiciones al producto fitosanitario. Usualmente los niveles dañinos de exposición a plaguicidas son resultados de accidentes en que varios pueden estar expuestos a estos productos. Los operadores agrícolas, flora, fauna y la población son el mayor riesgo de toxicidad. Estos plaguicidas se clasifican en grupos de alto o bajo grado de toxicidad, figura 18. El riesgo a afectaciones de salud depende de la categoría de toxicidad y la cantidad de exposición.

CLASIFICACIÓN DE LA OMS SEGÚN RIESGOS	FRANJA DE COLOR Y SIMBOLOGÍA DE LAS ETIQUETAS
Categoría I a SUMAMENTE PELIGROSO	 MUY TÓXICO
Categoría I b MUY PELIGROSO	 TÓXICO
Categoría II MODERADAMENTE PELIGROSO	 NOCIVO
Categoría III POCO PELIGROSO	CUIDADO
Categoría IV PRODUCTOS QUE NORMALMENTE NO OFRECEN PELIGRO	CUIDADO

Figura 18. Clasificación de plaguicidas según el grado de toxicidad. (Inostroza, Méndez, & Ríos, 2011)

Vías de ingreso al organismo

- Respiratorio: Al aplicar el plaguicida, este contamina la atmósfera que respiran los trabajadores, penetrando por inhalación al organismo.
- Digestiva: el ingreso de los productos tóxicos se produce cuando ingiere alimentos contaminados o por la ingestión directamente del plaguicida, produciendo una mayor toxicidad.
- Dermal: el ingreso se produce por contacto y absorción del plaguicida por medio de la piel, que está expuesta durante la aplicación.

3.3. Métodos de Fumigación Tradicionales

La fumigación es un método para el control o eliminación de ciertos tipos de plagas en el sector agroindustrial. La fumigación en Colombia ha sido tradicionalmente mediante método manual, o equipos motorizados. Los sistemas de fumigación tradicionales dependen del tipo de fumigación, frecuencia en la que se fumiga un cultivo, uso y tamaño de este, ya que, estos sistemas pueden ser tan elementales como la fumigadora de mano, el cual se utilizan para áreas más pequeñas de cultivos de papa o cultivos caseros, como también se encuentran las estacionarias fumigadoras para cultivos con mayor área de fumigado.

3.3.1. Clasificación métodos de fumigación

- Fumigadora manual: La fumigadora manual es una máquina que consta de un tanque de plástico para almacenamiento que puede contener hasta 20 litros de líquido y está fabricado en polietileno de alta densidad. La manguera está hecha de caucho reforzado; la cámara de presión, que es una de las partes más importantes de la máquina, debe mantenerse en constante mantenimiento para evitar fugas y complicaciones en el sistema de bombeo; varilla de bombeo de latón y funcionamiento tipo pistón; regulador de fluido o la llave que se encarga de gestionar el paso del líquido y mediante filtros evitar el taponamiento de la poma, la lanza de latón mide 60 cm de largo, la boquilla permite cambiar el método de pulverización (figura 19). Esta fumigadora manual es utilizada para áreas pequeñas de fumigado.



Figura 19. Fumigadora manual (autores)

- Fumigadora estacionaria (motor): Una fumigadora estacionaria es una máquina agrícola diseñada para facilitar el proceso de pulverización generalmente en cultivos de papa, figura 20. Consiste en depositar líquido en un contenedor al cual se le aplica presión, con el fin de buscar que las gotas caigan a la misma distancia y tengan el mismo tamaño gracias a la boquilla de ajuste. Su función principal es facilitar el proceso de riego, o en algunos casos pulverizar diversos tipos de productos líquidos, como agua, fertilizantes y productos fitosanitarios (plaguicidas) para combatir diversas plagas. Además, dado que el pulverizador tiene la capacidad de transportar el líquido mediante mangueras flexibles a una cierta distancia según las especificaciones de la máquina, los trabajadores no tendrán que cargar el líquido, obteniendo un mayor rendimiento.



Figura 20. Fumigadora estacionaria 160-ES30 (Potencia & Energia, 2021)

Las características que generalmente presentan estas fumigadoras estacionarias, es que presentan 4 lanzas con 4 pomas de aspersión, con un rango máximo de 400 metros. Por ende, este tipo de mecanismo para fumigación suele utilizarse para abarcar campos más amplios, figura 21. En el campo, es más efectivo utilizar pulverizadores fijos con diferentes boquillas especiales, que pueden llegar a los cultivos según las mismas condiciones y condiciones del terreno.



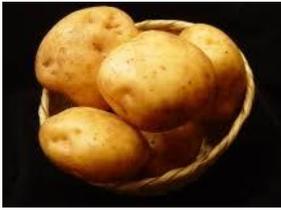
Figura 21. fumigadora estacionaria en funcionamiento (Autores)

3.4. Caracterización Cultivos De Papa

De acuerdo con las variedades que se cultive, la papa tiene unas características propias del producto, las cuales son utilizadas para diferentes fines. Según ICA, en Colombia existen más de 30 variedades de papa de las cuales 8 son de mayor importancia comercial en las diferentes regiones de Boyacá (Tabla 3), en las que sobresalen, Pastusa superior, Parda pastusa, Betina, Rubí, Ica-única, Diacol Capiro (R-12), Tucarreñe y criolla, el cual facilita la comercialización de estas diferentes presentaciones ya que todas las variedades no sirven para el procesamiento industrial o el consumo en fresco. En Colombia el 92% de la producción de estas variedades se destina a consumo en fresco y el 8% a procesamiento industrial (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015).

Tabla 3. Variedades de papa de mayor importancia en la región de Boyacá.

VARIEDAD	IMAGEN	DESCRIPCIÓN
Parda pastusa		Su cascara es de color rosa y crema, tiene una forma redonda aplanada con textura harinosa, se deshace fácil. Ideal para el consumo en fresco
Pastusa superior		Descendiente de la variedad parda pastusa. Esta variedad a remplazado a la principal variedad (parda pastusa), por su alta resistencia a factores bióticos (tizón tardío, virus pvv, roña). Ideal para el consumo en fresco

Betina		<p>Descendiente de la variedad parda pastusa. De forma redonda aplanada con textura harinosa y reconocido por los agricultores por su rusticidad y bajo consumo en fertilizantes.</p> <p>Ideal para el consumo en fresco</p>
Rubí		<p>Descendiente de la papa pastusa, de color rojo morado y forma redonda alargada.</p> <p>Ideal para el consumo en fresco</p>
Ica-única		<p>Tubérculos grandes de forma redonda alargada, cascara color crema, ojos de color morados y su pulpa de color amarillo-claro.</p> <p>Su producción se emplea para procesamiento industrial (papa en bastones).</p>
Diacol Capiro (R-12)		<p>Tubérculo de forma redonda cuyo color es roja, su interior es de color crema brillante.</p> <p>Ampliamente usada para procesamiento industrial (bastones y hojuelas) y para el consumo en fresco.</p>
Criollo		<p>Tubérculo de forma redonda, color amarillo y textura lisa.</p> <p>Ideal para consumo en fresco</p>
Tuquerreña		<p>Tubérculo de forma redonda aplanada, bicolor purpura y crema.</p> <p>Ideal para el consumo en fresco</p>

3.5. Vehículos Aéreos no Tripulados

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) son una clase de aeronaves que pueden volar sin la presencia de pilotos a bordo. Los sistemas de aeronaves no tripuladas consisten en el componente de la aeronave, las cargas útiles del sensor y una estación de control en tierra. Pueden controlarse mediante equipos electrónicos a bordo o mediante equipos de control desde tierra. Cuando se controla de forma remota desde tierra, se denomina RPV (Vehículo pilotado de forma remota) y requiere una comunicación inalámbrica confiable para su control.

(United States. Joint Chiefs of Staff, 2015)“Un vehículo aéreo motorizado que no lleva a bordo a un operador humano, utiliza las fuerzas aerodinámicas para generar la sustentación, puede volar autónomamente o ser tripulado de forma remota, que puede ser fungible o recuperable, y que puede transportar una carga de pago letal o no. (Cuerno Rejado Cristina, 2016) No se consideran UAV a los misiles balísticos o semibalísticos, misiles crucero y proyectiles de artillería”.

3.6. Historia de los UAV y su Desarrollo

Teniendo en cuenta que el término "drones" se refiere a cualquier dispositivo aéreo no tripulado. El primer vehículo aéreo no tripulado de la historia se informó por primera vez en 1839: un soldado austriaco atacó la ciudad de Venecia con globos no tripulados que estaban llenos de explosivos. Es importante señalar que el uso de estos vehículos, incluso en sus formas más tempranas, fue con fines militares. El Ruston Proctor Aerial Target desarrollado en 1916 fue la primera aeronave con alas sin piloto que se controló con control de radio de manera similar a la mayoría de los drones que existen en la actualidad (Stanley R. Herwitz, 2002).

La tecnología UAV mejoró enormemente durante la Segunda Guerra Mundial e incluso la Guerra Fría, donde se alega que fue utilizada con fines de vigilancia, en particular para tomar fotografías aéreas de bases militares por parte de la inteligencia de EE. UU. Y la antigua URSS. Los UAV se utilizaron ampliamente en la guerra moderna en 1982 cuando Israel utilizó una combinación de aviones tripulados y UAV para llevar a cabo ataques contra la flota siria con pérdidas mínimas. En particular, los vehículos aéreos no tripulados se utilizaron para identificar la posición del ejército sirio, bloquear sus líneas de comunicación y actuar como señuelos y garantizar que los aviones tripulados ejecutaran ataques con pocas o ninguna represalia. El éxito del ejército israelí generó interés internacional en la tecnología de drones y llevó a los países a invertir millones de dólares en este sector (Yanbo Huang, 2010).

Los primeros drones no militares fueron desplegados o comenzaron a ser utilizados en serio en 2006 por agencias gubernamentales que eran responsables del socorro en casos de desastre, la vigilancia de fronteras y la lucha contra incendios forestales con fines de vigilancia. Además, las corporaciones comenzaron a usar drones para inspeccionar tuberías y rociar pesticidas en sus granjas. También es importante señalar que la FAA emitió sus primeros permisos de drones comerciales en 2006, y durante los próximos ocho años, emitió un promedio de dos permisos por año. Las cosas cambiaron en 2013 cuando el CEO de Amazon, Jeff Bezos, anunció que la compañía estaba considerando usar drones para entregar paquetes a sus clientes y esto generó un interés público en el uso de drones. En 2015, la FAA emitió 1,000 permisos de drones y un año después otorgó 3,100 permisos.

En Japón, los drones se han utilizado en la agricultura de precisión durante más de 20 años. Por ejemplo, uno de los promotores más fuertes son los drones vendidos por Yamaha que abarcan actualmente el 35% de las plagas en los campos de arroz.

3.7. Importancia de los UAV's

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV por sus siglas en inglés) se utilizan cada vez más en la actualidad para tareas que anteriormente estaban siendo ejecutadas por aviones tripulados. Sin embargo, el uso generalizado o creciente de vehículos aéreos no tripulados en el espacio aéreo civil ha sido prohibido o restringido principalmente por organismos o agencias de la autoridad civil en diferentes partes del mundo, principalmente debido a su propósito histórico en el ejército. Por lo tanto, es necesario justificar por qué se debe permitir que los UAV compartan el espacio aéreo con otras aeronaves simplemente señalando sus usos y beneficios potenciales. El enfoque de este estudio es analizar el uso o aplicación de UAV en el sector agrícola.

Los UAV se han utilizado tradicionalmente en diferentes aplicaciones militares desde la Primera Guerra Mundial, donde se utilizaron principalmente con fines de práctica de tiro. Los UAV se han utilizado principalmente con fines de reconocimiento, observación aérea de artillería y drones para prácticas de tiro (Albert Rangoa, 2009). Recientemente, los vehículos aéreos no tripulados se han utilizado para llevar a cabo misiones de ataque profundo en las que se han lanzado bombas y misiles guiados de precisión en el interior de territorio hostil en áreas como Afganistán e Irak.

Los UAV se pueden configurar para funciones específicas tales como: patrulla marítima, búsqueda y rescate y patrulla fronteriza; estudio, vigilancia y fotografía aérea; investigación atmosférica y ambiental; aplicaciones agrícolas; telecomunicaciones; y transporte de carga. En la mayoría de estas aplicaciones, no se han aprovechado completamente en el pasado o se han cumplido utilizando tecnologías costosas como los satélites. Estos satélites son costosos de operar, tienen una vida útil corta, no se pueden reparar y dedican poco tiempo a su objetivo. En el caso de las aeronaves tripuladas, están limitadas principalmente por su tiempo de misión y factores humanos específicos (A. Lausch and D. Doktor, 2013). Como se ha señalado anteriormente, en la mayoría de los países, los UAV se han utilizado tradicionalmente en operaciones militares y gubernamentales.

Los cambios climáticos y un aumento en los costos generales de producción se han atribuido como los principales factores que han tenido un impacto en la seguridad alimentaria en el pasado reciente. Según las estadísticas de UNICEF 2017, es necesario aumentar la producción mundial actual de alimentos en un 50 por ciento para 2050 para alimentar satisfactoriamente a una población de nueve mil millones de personas. Las prácticas agrícolas actuales junto con el agotamiento de recursos como la tierra y el agua hacen que sea una tarea difícil de lograr.

Los actores clave del sector agrícola deben adaptar prácticas agrícolas eficaces que contrarresten los desafíos climáticos y de otro tipo que se han mencionado. Es necesario investigar y considerar la aplicabilidad de las tecnologías emergentes como soluciones efectivas para algunos, si no todos, los desafíos que se han mencionado en esta sección de introducción a través de la provisión de información precisa, confiable y oportuna a las partes interesadas clave en la industria agrícola.

Recientemente, ha habido un aumento en el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en el sector agrícola, principalmente con fines de planificación basada en pruebas y recopilación de datos. Los drones se han utilizado con éxito en varios sectores industriales, como el militar, la ayuda humanitaria, la gestión de desastres, y ahora es una tecnología emergente en el sector agrícola. Según un informe de PwC (PriceWaterhouseCoopers, 2016), actualmente se estima que el mercado de drones agrícolas tiene un valor de 32.400 millones de dólares. Los drones o UAV se utilizan actualmente en el sector agrícola para facilitar la producción de cultivos, el monitoreo del ganado, la provisión de sistemas de alerta temprana, la reducción del riesgo de desastres, la pesca, la silvicultura e incluso la conservación de la vida silvestre.

Los drones se están volviendo cada vez más populares principalmente debido a la diversidad de sus funciones. (Chapa, 2014) afirmó que imaginó una época en la que habría más de 30.000 UAV en los cielos de Estados Unidos como una escena de ciencia ficción, que pronto se convertirá en una realidad. (McAdams, 2015) informó que, de acuerdo con las predicciones de la Consumer Electronics Association, para 2025, los cielos de EE. UU. Se llenarán con hasta un millón de drones por día. (Tremayne & Clark, 2014) señaló que el aumento en la cantidad de drones se puede atribuir a los avances tecnológicos que han hecho que estos dispositivos sean mucho más funcionales y asequibles. Además de eso, ha habido un aumento en el tamaño del mercado que ha tenido un impacto positivo en la inversión en este sector.

3.8. UAV's en la Industria Agrícola

En 1983, Japón fue el primer país en intentar utilizar drones para la aplicación aérea de fertilizantes con el desarrollo del Sistema de Pulverización Aérea por Control Remoto (RCASS) de Yamaha Motor Corporation. Contribuyó a que los cultivos de arroz, soja y trigo de Japón aumentaran sus rendimientos, ya que podían usar drones de manera efectiva para controlar las plagas que podrían haber afectado su producción general. En 1990, Yamaha desarrolló el helicóptero R50UAS, que tenía una capacidad de carga útil de 44 libras. Posteriormente, en 1997, se desarrolló el R-MAX (helicóptero no tripulado), y en 2000, se había equipado con un sistema de sensores de azimut y sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) (Sadeghi, Jones y Philpot, 2015).

Actualmente, en Japón, el 90 por ciento de la protección de cultivos se logra mediante el uso de drones que han facilitado el control de plagas en el país. El caso de las granjas de Japón demuestra que los drones se pueden utilizar eficazmente para la pulverización de pesticidas y la aplicación de fertilizantes en la mayoría de las granjas de los países africanos. La razón de esto es que las dos regiones tienen un tamaño de explotación por agricultor comparable. En Japón, el tamaño medio de las explotaciones agrícolas es de 3,7 acres, mientras que en África es de 2 acres. Se considera que la aplicación aérea de agua, fertilizantes y pesticidas es muy beneficiosa en granjas que tienen hileras estrechas de cultivos y un terreno relativamente montañoso, ya que pueden ser obstáculos para los tractores.

El R-MAX se utilizó en el estudio de California y los datos mostraron que, aunque volaba a 12 mph, aún podía cubrir el área 10 veces más rápido que en el caso de los tractores (Associated Press, 2014).

3.9. Aplicaciones Agrícolas Para los UAV's

La versatilidad de los drones significa que pueden usarse para una variedad de aplicaciones agrícolas las cuales se exponen a continuación:

3.9.1. Evaluación de cultivos

Estos drones están equipados con sensores que son capaces de medir longitudes de onda específicas de luz que es absorbida y reflejada por las plantas, lo que conduce a la generación de imágenes de color contrastado que resaltan las áreas problemáticas en un campo de cultivo (Van Loon, Speratti, & Govaerts, 2018). Las imágenes que se generan a partir de los datos que recopilan los drones incluyen mapas de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que se crearon previamente mediante el uso de satélites y aviones mediante el cálculo de la relación de la diferencia entre la radiación de luz visible e infrarroja cercana.

Un NDVI fuerte es indicativo de una alta densidad de plantas en un área, mientras que un NDVI débil puede interpretarse como la identificación de áreas problemáticas en un campo de cultivo. La figura 22 muestra la diferencia entre una hoja sana y muerta usando su luz reflejada.

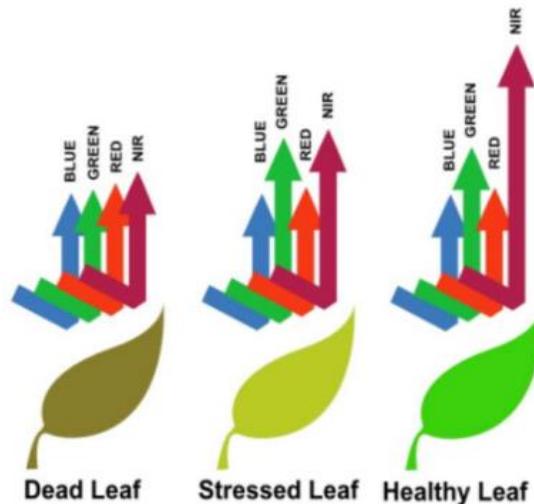


Figura 22. NDVI y sanidad vegetal. (E-Agriculture in Action: Drones for Agriculture (p.3), por Gerard Sylvester, 2018, Bangkok).

Como se ha señalado, un informe del NDVI puede ayudar a los agricultores a distinguir el área del campo donde los cultivos están creciendo bien y donde no. Luego, un agricultor puede crear zonas en la finca en las que se aplicarán diferentes cantidades de fertilizante, según las necesidades o requisitos del campo.

3.9.2. Seguimiento de enfermedades

Para que un agricultor pueda cosechar el mayor rendimiento posible, es esencial evaluar regularmente la salud del cultivo y tratar de detectar infecciones bacterianas o fúngicas en las plantas. En el pasado, los agricultores tenían que ir a sus granjas y evaluar físicamente el estado de sus plantas, lo que puede ser una tarea física y llevar mucho tiempo para el agricultor (Zhang y Kovacs, 2012). Sin embargo, hoy en día, la aplicación de la tecnología de drones significa que los agricultores pueden cubrir un gran terreno en poco tiempo sin la necesidad de viajar físicamente y evaluar el estado de las plantas.

El uso de drones para monitorear enfermedades se ha probado en diferentes partes del mundo con considerable éxito. Por ejemplo, en Sri Lanka, los agricultores han utilizado el dron eBee para advertirles sobre sus plantas que han sido infestadas por enfermedades o plagas 10 días antes de que puedan verlas con sus ojos "desnudos". Según Salman Siddiqui, quien es el jefe de la unidad de datos y sensores remotos de IWMI GIS, mediante el uso del infrarrojo cercano, un agricultor puede identificar el estrés en las plantas 10 días antes de que se vuelva visible a través de la captura de las imágenes de actividad fotosintética.

3.9.3. Pulverización de pesticidas y fertilizantes en cultivos

La fumigación es una rama muy importante y en perspectiva de la agricultura de precisión. Con frecuencia, esta tarea es común para los pulverizadores terrestres y la aviación agrícola. Sin embargo, hoy en día es posible utilizar vehículos aéreos no tripulados para esta tarea, es decir, los agricultores japoneses que utilizan helicópteros no tripulados y el 40% de todos los campos de arroz en Japón se rocían con la ayuda de drones. El método mencionado anteriormente es mucho más barato que la aviación agrícola regular debido al menor consumo de combustible y costos.

los UAV pueden rociar diferentes tipos de productos químicos fitosanitarios. Hoy en día existen muchos productos fitosanitarios. Los principales plaguicidas que se utilizan en la agricultura de precisión son:

- insecticidas;
- fungicidas;
- herbicidas.

Existe el argumento de que se estima que la fumigación de cultivos con drones es cinco veces más rápida que el uso de maquinaria regular. La siguiente figura 23 ilustra cómo los drones son efectivos en la fumigación de cultivos en una región de la granja, donde los tractores e incluso los rociadores humanos no pueden llegar debido a la densidad del cultivo.



Figura 23. Dron rociando cultivos (Reportero de Tecnología de Negocios, 2018 por Chris Baraniuk)

Espacio dejado en blanco intencionalmente.

Capítulo 4

Metodología Aplicada

Para el diseño se realizó un análisis de los requerimientos primordiales que requiere este tipo de sistemas de pulverización, con lo cual se estipuló la configuración óptima para el uso en cultivos de papa para su respectiva fumigación en plantas, consiguiendo un producto que permita maximizar el rango de fumigación para el cultivo y permita minimizar los tiempos, así como disminuir la carga laboral y el contacto con el producto fitosanitario en los agricultores encargados de la producción y cuidado de dichos cultivos.

Para diseñar el dron, primero se selecciona los componentes de pulverización, luego, con respecto al peso de la carga útil y los componentes de pulverización, se selecciona el motor, la hélice, el controlador electrónico de velocidad, las bombas, la cámara con vista en primera persona y el transmisor de video. La batería debe seleccionarse conociendo los requisitos de corriente y voltaje de los componentes. Luego, se debe calcular el requerimiento de empuje, velocidad horizontal, velocidad vertical, tiempo de vuelo y, finalmente, se diseña la estructura del multirrotoir determinando el número de brazos necesarios, la longitud de estos y la aplicación de la carga útil.

De acuerdo con lo anterior, se realizó el diseño CAD del UAV con el sistema de pulverización y la simulación en Xcalc Copter dentro de los parámetros establecidos según línea base y cálculos basados en fundamentación teórica, con el fin de avalar las características que debe poseer el UAV para que realice la misión deseada (Fumigación de cultivos de papa) cumpliendo los objetivos propuestos.

Finalmente, Se obtiene un diseño de un UAV fumigador aéreo no tripulado con configuración de hexacoptero, carga útil de 20 kg; una tasa de pulverización de 3.6 litros por minuto; una franja de pulverización de 5-6 metros y 15 minutos de tiempo de vuelo. Lo cual permite el recorrido de los 130m² (metros cuadrados) del área propuesta; demostrando que el UAV es capaz de soportar el peso del sistema de pulverización y tanque de almacenamiento para el producto fitosanitario sin afectar su vuelo, comprobando que es posible utilizar esta tecnología en los cultivos de papa en la región Úmbita- Boyacá

4.1. Proceso de Diseño

El hexacoptero es una configuración de dron de donde hay seis brazos. El marco principal está hecho en aluminio aeroespacial 6061-T6 y cada brazo tiene una longitud de 900 mm. En cada extremo del brazo del dron, se fija un motor y la hélice se acopla mecánicamente al motor. Para los seis motores se conectará un controlador electrónico de velocidad (ESC) y en la entrada del (ESC) se conectará al controlador de vuelo. La otra entrada del ESC se conectará a la placa de distribución de energía donde la alimentación es proporcionada por la batería Li-Po. De forma similar se conectarán todos los demás ESC, motores y hélices. Un receptor se conectará al controlador de vuelo para recibir las señales de la emisora. Al controlador de vuelo se conectará una cámara FPV y un transmisor adecuado conectados entre sí. El tanque de almacenamiento con capacidad de 20 litros se acopla mecánicamente al bastidor o chasis del dron, el fondo del tanque tendrá una pendiente para que todo el

tanque se vacíe completamente.

El sistema de pulverización irá ubicado en los brazos (1, 2, 4, 5), el cual está conformado por un tubo plástico de 1,2 metros de longitud y dos boquillas de pulverización fijadas a 50 cm entre sí. Cuatro bombas son alimentadas desde un tablero de distribución de energía, la entrada de cada una de las bombas está conectada a un medidor de flujo electromagnético y al tanque de almacenamiento, la salida está conectada al tubo de plástico donde se fijan las boquillas. El marco de aterrizaje de 730 mm de altura está conectado al marco principal para que el aterrizaje del dron sea seguro y el tanque de almacenamiento no toque el suelo.

Para el funcionamiento del dron, las señales serán transmitidas desde el transmisor y serán recibidas por el receptor en el dron. Desde el receptor la señal va al controlador de vuelo donde la señal será procesada con los sensores del acelerómetro y el giroscopio. La señal procesada será enviada al ESC, que permite la cantidad específica de corriente al motor basada en la señal que recibe. Las hélices están acopladas mecánicamente a los motores para que giren y produzcan empuje. La cámara FPV toma la corriente del controlador de vuelo y graba el vídeo. las señales de video serán procesadas por el transmisor y serán recibidas por el receptor en tierra. La bomba toma la corriente de la batería Li-Po y presuriza el líquido del tanque de almacenamiento. luego el líquido fluye a través de la tubería, entra en la boquilla y luego se pulveriza. El caudal de la bomba es controlado por el medidor de flujo electromagnético el cual puede ser controlado desde el transmisor. La figura 25 es un diagrama de flujo sobre el funcionamiento del sistema de aspersión y pulverización.

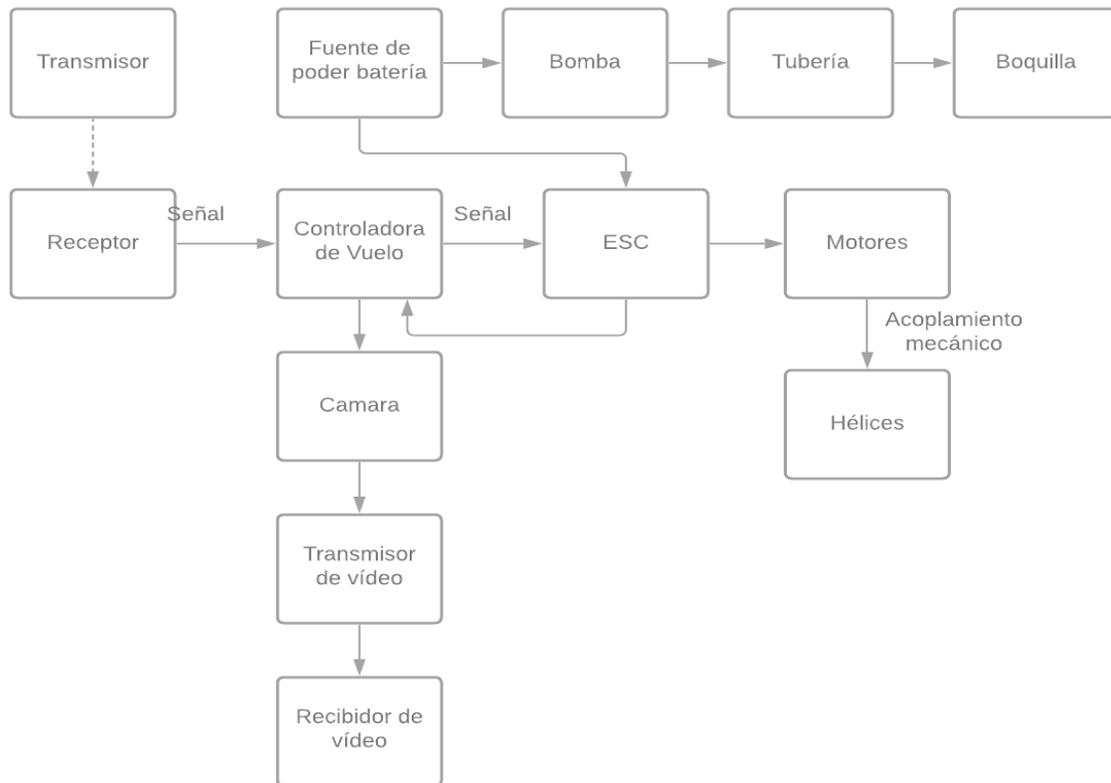


Figura 24. Diagrama de bloque del funcionamiento del UAV (Autores)

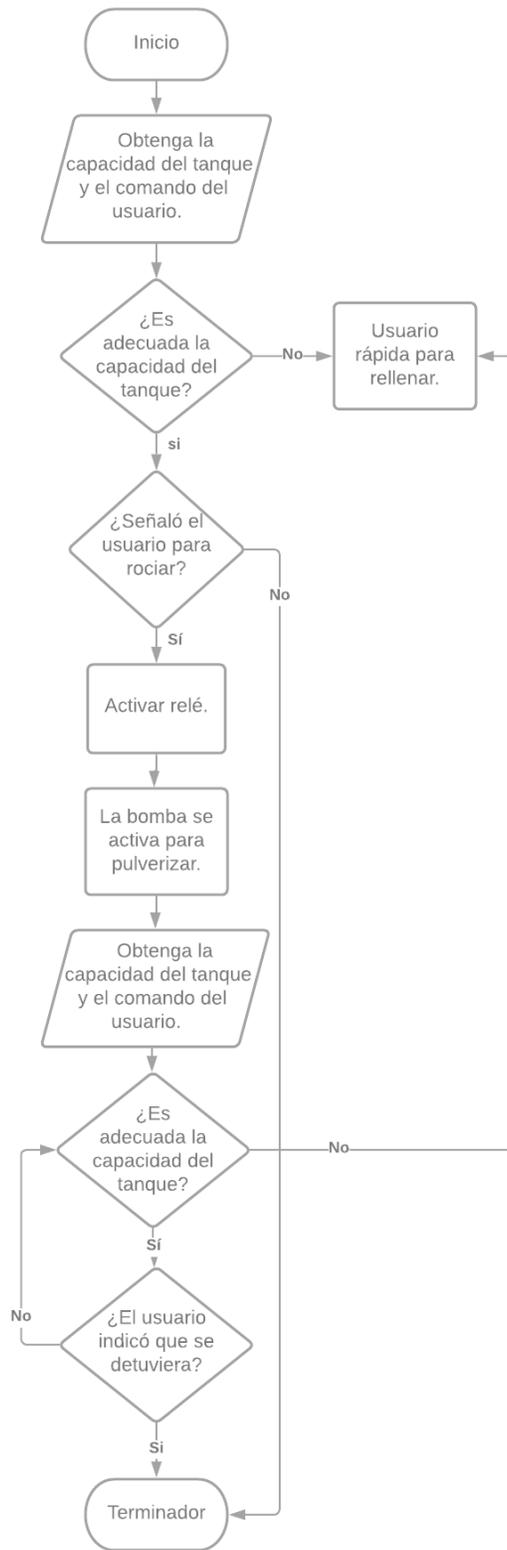


Figura 25 Diagrama de funcionamiento del Sistema de pulverización.

4.2. Línea Base: UAV's de Fumigación

Esta propuesta de tesis es novedosa debido a que en Colombia no se ha encontrado documentación acerca del diseño de un dron con propósitos de pulverización en cultivos en general.

Tabla 4. Línea base de UAV's especializados en agricultura de precisión con pulverización.

AGRAS MG 1P	
 <p style="text-align: center;">Fuente: (DJI, 2021)</p>	<p>Octo-cóptero diseñado para la pulverización con precisión de pesticidas, fertilizantes y nutrientes, brindando nuevos niveles de eficiencia y manejabilidad en la agricultura.</p> <p>El sistema de propulsión permite que la aeronave transporte cargas útiles líquidas de hasta 10 kg, incluidos pesticidas y fertilizantes. El agras MG 1P puede cubrir un área de 4000-6000 m² en solo 10 minutos. El sistema de pulverización inteligente ajusta automáticamente su pulverización de acuerdo con la velocidad de vuelo para que siempre se aplique una pulverización uniforme. De esta forma se regula con precisión la cantidad de pesticida o fertilizante para evitar la contaminación y economizar las operaciones.</p> <p>Cuenta con sistema de radares multidireccionales capaz de detectar ramas, cables a una distancia de 15 metros, y manteniendo la altura designada si el terreno es irregular.</p>
Parámetros de vuelo	
Modelo	Agras MG 1P
Configuración	Octocóptero
Peso total (sin batería)	8.8 Kg
Peso de despegue	22.5 Kg
Peso Max. de despegue	24.5 Kg
Relación máx. de empuje a peso	1.8Kg (con peso de despegue de 23.8 kg)
Duración Max del vuelo estacionario	24min (12000 mAh y peso de despegue de 12.5 kg) 9 min (12000 mAh y peso de despegue de 22.5 kg)

Velocidad máxima de funcionamiento	8 m/s
Velocidad máxima de vuelo	12 m/s (Modos P y F, con GPS); 15 m/s (Modo A)
Altura máx. de servicio sobre el nivel del mar	2000 m
Consumo eléctrico en vuelo estacionario	3800 W (con un peso de despegue de 23.7 kg)
Motor	
Referencia	Agras MG-1 6010 Kv130
Tamaño estator	60x10mm
Kv	130 rpm/v
Empuje máximo	5.1 kg/rotor
Máxima potencia	770 W
Peso (con ventilador enfriamiento)	280 g
Hélices	
Hélices	Plegables
Material	Plásticos de ingeniería de alto rendimiento
Diámetro/paso	21x7.0 pulgadas
Peso	58 g
Control de velocidad -ESC	
Corriente máxima	25 Amp
Voltaje de funcionamiento	12 S-lipo
Frecuencia de señal	30 a 450 Hz
Módulo de radar alta precisión	
Modelo	RD2412R
Dimensiones	109 x 152 mm
Rango precisión	0.10 m
Potencia entrada	12-30 V
Consumo eléctrico	12 W
Altura mantenida y altura constante	Rango de la medida de altitud: 1-30 m Rango de altitud mantenida: 1.5-3.5 m
Rango de detección de obstáculos	1.5-30 m
Frecuencia funcionamiento	MIC y KCC: 24.05 GHz - 24.25 GHz SRRC & CE & FCC: 24.00 GHz - 24.25 GHz
Peso	406 g
Batería	
Capacidad	12000 mAh
Modelo	MG-12000P
Voltaje	44.4 V
Ciclos de carga	300
Tipo batería	Lipo 12S
Potencia máxima	1200 W
Peso	4 kg

Tanque de almacenamiento (liquido)	
Dimensiones	151mm x 195mm x 70 mm
Material	Plástico
Capacidad	10 litros
Boquillas	
Modelo	XR11001 VS
Cantidad	4
Velocidad máxima pulverización	0.43 L/min (por boquilla)
Ancho de pulverización	4-7 m (4 boquillas, 1.5-3 m por encima del cultivo)
Tamaño de gota	130 ~ 250 μm (El tamaño de las gotas puede variar según el entorno de operación y la velocidad de pulverización)
Radar de seguimiento del terreno	
Módulo de modulación	FMCW
Frecuencia	24 GHZ
Altura fija	1 ~ 10 m
Exactitud de rango	0.02 m
Temperatura de funcionamiento	-10 °C a 40 °C
Radar de evasión de obstáculos	
Rango de detección	2 ~ 20 m
Condiciones de uso	La altura relativa de vuelo de la aeronave es superior a 1,5 m y la velocidad es inferior a 6 m / s
Distancia segura	4 m
Exactitud de rango	0.02 m
Temperatura de funcionamiento	-10 °C a 40 °C

Referencia	Agras MG-1 6010 Kv130
Tamaño estator	60x10mm
Kv	90 rpm/v
Empuje máximo	14 kg/rotor
Máxima potencia	2500W
Hélices	
Hélices	Plegables
Material	Plástico/compuesto de ingeniería
Diámetro/paso	30x12 pulgadas
Control de velocidad -ESC	
Corriente máxima	40 A
Voltaje de funcionamiento	14 S-lipo
Frecuencia de señal	30 a 450 Hz
Tanque de almacenamiento (liquido)	
Capacidad	16 litros
Material	Plástico
Boquillas	
Modelo	Lechler 110-01
Cantidad	4
Altura de pulverización	2 a 4 m
Velocidad de vuelo optimo pulverización	4-6 m/s
Ancho de pulverización	3-5.5 m (sujeto a tipo de cultivo)
Batería	
Voltaje	58.8 V
Velocidad de descarga	15 C
Tipo de batería	14S
Duración de la batería	200 ciclos
Capacidad	17000 mAh
Cámara	
Cámara	Fvp
Angulo de visión	70°
Resolución	700P
Lente	12 megapíxeles

FDXD-8R



Fuente: (AeroSmart, 2021)

El dron de pulverizador FDXD-8R es un dron agrícola que reemplaza al fumigador tradicional. Ahorra un 90% de agua y un 30% - 40% del producto fitosanitario. El radar digital omnidireccional, puede detectar obstáculos desde todas las direcciones horizontales eludiendo obstáculos automáticamente mientras vuela sobre varios terrenos, lo que garantiza un alto nivel de seguridad operativa. También viene con una cámara FPV en tiempo real y dos reflectores, que brindan a los usuarios vistas completas en vivo incluso de noche

Parámetros de vuelo

Modelo	G200 (16L)
Distancia entre eje	2122 mm
Configuración	Hexacoptero
Peso (sin sistema de pulverización)	14 Kg
Peso total	55 Kg
Duración Max del vuelo estacionario	15 min
Velocidad máxima de vuelo	8 m/s
Altura máx. de servicio sobre el nivel del mar	3500 m
Velocidad máxima de ascenso	5 m/s
Velocidad máxima de descenso	3 m/s

Motor

Modelo	X8
Tamaño estator	81x20 mm
Kv	100 rpm/v
Empuje máximo	15.3 kg/rotor
Peso	1040 g

Hélices

Hélices	Plegables
Material	Fibra de carbono
Diámetro/paso	29x11 pulgadas
Peso	180 g

Control de velocidad -ESC

Corriente máxima	80 A
Voltaje de funcionamiento	14 S-lipo
Frecuencia de señal	30 a 450 Hz

Tanque de almacenamiento (liquido)	
Capacidad	22 litros
Boquillas	
Modelo	XR11001 VS
Cantidad	4
Caudal	3.6 l/min
Presión	0.58 Mpa
Bomba peristáltica	
Modelo	PP-14 ^a
Cantidad	4
Voltaje	32 V
Pulverización máxima	1.4L / min (bomba única) 5.6L / min (todas las bombas)
Batería	
Voltaje	50.4 V
Velocidad de descarga	15 C
Duración de la batería	200 ciclos
Capacidad	16000 mAh
Cámara	
Cámara	Fvp
Angulo de visión	70°
Resolución	700 tvl
Pixeles	976 H x 582 V
Radar de seguimiento del terreno	
Dimensiones	109 x 69 x 34mm
Módulo de modulación	6UL
Frecuencia	528 MHZ
Altura fija	1 ~ 10 m
Exactitud de rango	0.02 m
Peso	413 g

XAG P30



Fuente: (XAG, 2021)

El dron XAG P30 permite pulverizar cultivos de manera fácil, eficiente y seguras a través de operaciones inteligentes que aplican tratamientos líquidos y precisión en cualquier cultivo agrícola.

El P30 utiliza el sistema de pulverización con atomización inteligentes patentado por XAG que cuenta con una alta eficiencia protegiendo el medio ambiente, ya que reduce el uso de pesticida un 30%, y de agua un 90%. Las gotas microscópicas son lanzadas a través de un sistema de pulverización giratorias haciendo que estas se adhieran uniformemente a la superficie de los cultivos. El tanque inteligente está conectado con el dron a través de bluetooth. Esto le permite al XAG P30. Esto permite que el dron pueda conocer la cantidad de líquido restante en el depósito y calcular el flujo de pulverización con precisión.

Además, el dron cuenta con un sistema radar omnidireccional de 360 grados que permite evitar obstáculos automáticamente y de manera eficiente sin necesidad de una base portátil RTK. Cuenta con un sistema XAI Agricultura Inteligente, que combina la información geográfica del terreno del cultivo y los mapas donde se van a llevar a cabo la pulverización para que los agricultores puedan “fumigar solo donde se necesita” ahorrando tiempo y recursos

Parámetros de vuelo

Modelo	XAG P30
Dimensiones entre ejes	1560 mm
Dimensiones (hélices plegadas)	1262x1250x490 mm
Configuración	Cuadricóptero
Peso (sin batería)	16.05 kg
Peso (máximo al despegue)	38.5 kg
Relación empuje/peso	2.05
Tiempo vuelo	18min (22 kg de peso de despegue) 10 minutos (38 kg de peso de despegue)
Resistencia máxima al viento	10 m/s

Velocidad máxima de vuelo	12 m/s
Altura máx. de servicio sobre el nivel del mar	4000 m
Motor	
Referencia	A16
Tamaño estator	80x20 mm
Kv	100 rpm/v
Empuje máximo	19.5 kg/rotor
Hélices	
Modelo	F3612CCW/F3612CW
Hélices	Plegables
Material	Fibra de carbono
Diámetro/paso	36x12.8 pulgadas
Peso	271 g
Control de velocidad -ESC	
Modelo	VC12100
Corriente máxima	100 A
Voltaje de funcionamiento	52.2 V (12 S-lipo)
Frecuencia de señal	30 a 450 Hz
Tanque de almacenamiento (liquido)	
Modelo	LT-3016A
Capacidad	16 litros
Boquillas	
Modelo	SNZ-14000A
Cantidad	4
Ancho de pulverización	2-6 m
Tamaño gota	90-550 μ m (ajustable)
Presión	0.58 Mpa
Batería	
Voltaje	50.4 V
Velocidad de descarga	15 C
Duración de la batería	200 ciclos
Capacidad	18000 mAh
Radar de seguimiento del terreno	
Módulo de modulación	TR24S30
FOV	35°
Potencia	5 W
Frecuencia	40 GHZ
Rango de detección de altitud	0.5~ 30 m
Mantener rango de altitud	\geq 1m
Radar de evasión de obstáculos	
Modelo	OM24S30
Potencia	2 W
Frecuencia	40 GHZ

Cantidad	2
Rango de detección	2 ~ 30 m
Mantener rango de altitud	≥ 1 m

4.3. Selección del Modelo UAV

Con base a las características de los UAVS de fumigación (línea base). Se eligió la configuración de hexacoptero. La configuración de Hexa-coptero se eligió debido a la versatilidad de despegue y aterrizaje vertical, así como el grado de libertad de movimientos, proporciona un buen compromiso entre los tiempos de vuelo del cuadricóptero y la estabilidad de un Octo-cóptero (Agrawal & Shrivastav, 2015). El Hexa-coptero tiene seis motores que están montados en 6 marcos simétricos que forman un Angulo de 60° entre sí. Tiene 3 juegos de hélices que giran en sentido de las agujas del reloj y 3 hélices que giran en sentido contrario a las agujas del reloj. Figura 25. Debido al número de motores que proporcionan una mayor fuerza de elevación. Tiene como ventaja que, si uno de sus motores falla, el UAV puede permanecer lo suficientemente estable para un aterrizaje seguro (OscarLiang, 2021).

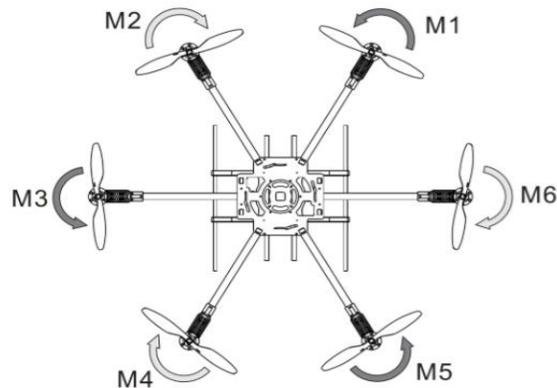


Figura 26. Hexa-coptero (Tech Unmanned, 2012)

4.4. Selección de Componentes de Fumigación

Para la selección de componentes, se ha tomado como punto de partida los drones fumigadores seleccionados en la línea base. Se han elegido estos componentes (tabla 4) en función de las características de los mismo, prestando especial atención en la eficiencia, tamaño y peso, para lograr un hexacoptero ligero y eficiente al momento de la pulverización del plaguicida.

Tabla 5. Componentes para fumigación ideales y sus características

Boquilla	
	La boquilla de tipo abanico son ideales para la pulverización de plaguicidas. Esta boquilla con un caudal de roció de 3.6 l/mi obtiene un ángulo ancho de pulverización de 110° permitiendo cubrir un área mayor de fumigación.
Modelo	XR11001VS
Caudal máximo de rociado	3.6 l/min
Ancho de pulverización	5-6 m (8 boquillas, volando a 1.5-3 m por encima del cultivo)
Tamaño de gota	130-250 µm
Peso	0.1 kg
Bomba de agua	
	El sistema requiere una mini bomba de agricultura sin escobillas de diafragma de presión de 3.5 l/m. Fabricado en polímero deforma que se puede utilizar a la intemperie protegiéndolo al polvo y productos fitosanitarios.
Potencia	35 W
Flujo	3.5 l/m
Voltaje	12 V
Presión máxima	0.6 Pa
Presión nominal	0.48 Pa
Peso	0.2 kg
Medidor de flujo	
	El medidor de flujo electromagnético monitorea y controla el caudal suficiente para cada una de las boquillas de pulverización.
Medidro de flujo	0.3-6 l/m
Resistente presion agua	0.8 Mpa
Voltaje trabajo	DC5 ~ 24 V
características del pulso de flujo	$f = (23 * Q - 3) Q = \pm 3\%$ L/min
Peso	0.2 kg
RADAR DE COBERTURA 360°	

		<p>El radar omnidireccional detecta obstáculos desde todas las direcciones horizontales. También puede sortear obstáculos automáticamente mientras vuela sobre varios terrenos, lo que garantiza un alto nivel de seguridad operativa. Con este radar,</p>
Peso		0.3 kg

4.5. Estimación de Peso

Una vez determinado el modelo del UAV, es importante determinar los componentes requeridos para el diseño. En la tabla 6, se indica la cantidad y peso de los componentes de fumigación para realizar la estimación de peso. Con base a los datos obtenidos de dicha estimación, se calcula la potencia requerida que deberán tener los motores y se hará la selección del motor con base a fichas técnicas de los fabricantes.

Tabla 6. Componentes, unidades y peso en Kg de cada uno

<i>COMPONENTES</i>	<i>Unidades</i>	<i>Peso</i>	<i>Unidad de medida</i>
<i>Estructura</i>	1	7.149	Kg
<i>PMU</i>	1	0.1	Kg
<i>Controladora</i>	1	0.2	Kg
<i>Bomba de agua</i>	4	0.8	Kg
<i>Boquilla</i>	8	0.8	Kg
<i>Medidor de flujo</i>	1	0.2	Kg
<i>Tanque de almacenamiento</i>	1	0.5	Kg
<i>Carga útil (pesticida)</i>	1	20	Kg
<i>Cámara FPV</i>	1	0.015	Kg
<i>Radar de cobertura 360°</i>	1	0.3	Kg
<i>Tubería agua</i>	4	0.2	Kg
<i>Tornillería y conectores</i>	1	0.1	Kg
<i>TOTAL</i>		30.364	Kg

El peso bruto (TW)= **30.364 kg**

El peso bruto de despegue (TW), que se deriva de la tabla de estimación de peso, se ha considerado como referencia para la selección de los componentes de propulsión. De acuerdo con lo anterior, se calcula el empuje (T) que debe generar cada motor, obteniendo una referencia para la selección del motor y hélice.

Datos:

- Peso bruto: 30.364 Kg
- Relación de empuje/peso (TWR): 2.0 para vuelos eficientes de 10-15 minutos
- Numero de motores: 6
- *Empuje*

$$T = TW * TWR [Kg] \quad \text{Ec. 1}$$

Fuente: Tomado de apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

$$30.364 * 2.0 = 60.728 [Kg]$$

- Empuje por motor

$$\frac{T}{N^{\circ} \text{ motores}} [Kg] \quad \text{Ec. 2}$$

Fuente: Tomado de apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

$$\frac{60.728}{6} = 10.12 [Kg]$$

El empuje que los motores deben generar es igual a 60.728 Kg. De acuerdo con la configuración (hexacoptero) cada motor debe generar un empuje de 10.12 Kg.

Para la selección de los componentes de propulsión (motores, hélice, batería, esc), se debe tener en cuenta el peso de estos componentes, el cual representan aproximadamente el 30 a 40 % del peso total del UAV. Si no se tiene en cuenta esta sobrecarga, el UAV puede causar dificultades en el control y el despegue. En función de los datos, al peso total 30.364 Kg se añadió un 35% y la selección se hizo en alrededor de 41 Kg.

- *Empuje*

$$T = TW * TWR [Kg]$$

$$41 * 2.0 = 82 [Kg]$$

- Empuje por motor

$$\frac{T}{N^{\circ} \text{ motores}} [Kg]$$

$$\frac{82}{6} = 13.6 [Kg]$$

El empuje que los motores deben generar es igual a 82 Kg. De acuerdo con la configuración seleccionada, cada motor debe generar un empuje máximo de 13.6 Kg.

4.6. Motores

Los motores que se ajustan al empuje requerido de 13.6 Kg son los motores agrícolas T-Motor U15II Kv 80 (Figura 26). Este motor cuenta con una bobina anticorrosiva y un recubrimiento especial que consigue que la bobina esté libre de la corrosión de los pesticidas. La estructura de celosía tiene en cuenta los efectos a prueba de polvo y mayor impermeabilidad, lo que permite el uso en varios entornos (T-Motor, 2021). Estos motores pudieron adaptarse a las necesidades adicionales de aceleración y las condiciones ambientales, proporcionando un potente empuje y alto rendimiento. Observar la tabla 7 para los parámetros del motor.



Figura 27. Visualización del motor físico y sus medidas (T-Motor, 2021)

Tabla 7. Ficha técnica y datos de los motores prospectos.

<i>FICHA TÉCNICA</i>	<i>Datos</i>	<i>Unidad de medidas</i>
<i>Tamaño</i>	147.5 * 64	mm
<i>Diámetro del eje</i>	20	mm
<i>Peso motor</i>	1.7	Kg
<i>Máximo empuje</i>	28.9	kg
<i>Numero de celdas (lipo)</i>	12-24	S
<i>RPM</i>	80	Kv
<i>Configuración</i>	36N42P	-
<i>Corriente máxima</i>	110	A
<i>Resistencia interna</i>	17	mΩ
<i>Potencia máxima</i>	8580	W

La tabla 8 muestra los datos del empuje del motor seleccionado. Cada uno de estos motores con un voltaje de 50 V y en combinación con una hélice G40 pulgadas de ancho y un área de barrido del viento de 13.1 pulgadas; soporta una fuerza de elevación de 29 Kg al 100% de aceleración. Dado que hay un total de 6 motores en el UAV, se genera un empuje aproximadamente de 174 Kg. Este valor fue óptimo ya que el empuje que generan los motores es mayor que el empuje de 82 kg calculado anteriormente.

Tabla 8. Carga de datos de prueba del motor

Datos de Pruebas de Carga										
Temperatura Ambiente			20°		Voltaje			DC Fuente de poder		
U15II KV80	50	T-MOTOR G40x13.1CF	Acelerador	Corriente (A)	Potencia (W)	Empuje (G)	RPM	Eficiencia (G/W)	Torque (N*m)	Temperatura de operación (°C)
			50%	19.9	995	8900	1843	8.94	4	65
			55%	25.9	1295	10800	2023	8.34	5	
			60%	32.2	1610	12700	2180	7.89	5.9	
			65%	38.6	1930	14600	2313	7.56	6.9	
			75%	56.2	2810	18900	2615	6.73	9.1	
			85%	76.9	3845	23100	2876	6.01	11.2	
			100%	110.4	5520	28900	3193	5.24	14	

4.7. Hélices

Componente importante del UAV basado en el tamaño del motor. De acuerdo con las características del motor T-Motor P80, se seleccionó la hélice T-Motor de 40 pulgadas de diámetro de disco y 13.1 pulgadas de paso medio (figura 27). Esta hélice de material compuesto reforzado con fibra de carbono puede soportar una fuerza de elevación de 60 Kg. En la tabla 9, se muestra las especificaciones de la hélice seleccionada.



Figura 28. Visualización física de la hélice prospecta. (T-Motor, 2021)

Tabla 9. Ficha técnica y datos de la hélice prospecto.

<i>FICHA TECNICA</i>	<i>Datos</i>	<i>Unidad de medidas</i>
<i>Diámetro</i>	40*13.1	in
<i>Material</i>	CF+Epoxy	-
<i>Peso</i>	0.2	Kg
<i>Temperatura de trabajo</i>	-40 ~ 65	°C
<i>Limitación de empuje</i>	60	Kg

<i>Espesor de centro</i>	12	Mm
<i>Espesor para tornillo</i>	4	mm

4.8. Controlador de velocidad (ESC)

El control del motor se realiza mediante un controlador de velocidad electrónico (ESC). Los dos parámetros principales para la selección del ESC incluyen el rango de potencia en el que el ESC puede operar y la corriente máxima que puede entregar. El amperaje máximo que puede manejar un ESC debe ser mayor que el que consumirá la combinación de motor / hélice.

En términos de ESC, sugerir un 20% -50% de amperios adicionales es una buena regla para garantizar que su ESC no se queme. Una fórmula simple, $ESC = 1.2-1.5 \times$ amperaje máximo nominal del motor. Para los motores seleccionados (T-Motor U15II Kv 80), este valor fue soporte de fuente para la selección del ESC, donde cada motor al 100% de aceleración consume una corriente máxima de 143A.

De acuerdo con la formula anterior y con el valor de corriente máxima por motor. Aplicamos la fórmula para conocer el amperaje requerido del ESC, para que este genere la potencia requerida y el buen funcionamiento de los motores.

- Potencia mínima del ESC:

$$ESC = 1.2 * \text{amperaje máximo nominal del motor} \quad \text{Ec. 3}$$

Fuente: Tomado de apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

$$1.2 * 110 A = 132 A$$

El amperaje mínimo requerido para elección del ESC es de 132 A

- Potencia máxima del ESC:

$$ESC = 1.5 * \text{amperaje máximo nominal del motor}$$

Fuente: Tomado de apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

$$1.5 * 110 A = 165A$$

El amperaje máximo requerido para la elección del ESC es de 165 A

De acuerdo con los datos anteriores, el ESC se debe seleccionara entre los rangos 132 Amperios a 165 amperios. El controlador de velocidad recomendado para conducir una corriente de 110 A es T-Motor 150 Amperios (Figura 28). La tabla 10 detalla las especificaciones del ESC.



Figura 29. Visualización de el ESC comercial Flame 180A 12S V2.0. (T-Motor, 2021)

Tabla 10. Ficha técnica del ESC Flame 180^a 12S V2.0 prospecto.

<i>FICHA TECNICA</i>	<i>Datos</i>	<i>Unidad de medida</i>
<i>Dimensiones</i>	L*W*H 112.2*50.5*35.5	mm
<i>Corriente continua</i>	180	A
<i>Corriente pico</i>	200	A
<i>Entrada</i>	6-14	S
<i>Peso</i>	0.1	Kg

4.9. Batería

Normalmente las baterías litio están compuestas por múltiples celdas, cada una de las cuales tienen un voltaje nominal de 3.7 V. La configuración de estas celdas nos indica el voltaje de la batería y de acuerdo con el voltaje dependerá el empuje del motor.

De acuerdo con los datos del motor, ESC y tiempo de vuelo teórico. Se calcula el número de celdas necesario y el amperaje requerido de la batería lipo, tabla 11.

Tabla 11. Datos tomados de las especificaciones de cada componente para el cálculo del número de celdas de la batería:

<i>T-Motor U15II Kv80</i>	<i>Datos</i>	<i>Unidad de medida</i>
<i>Corriente consumida por motor a un empuje del 100%</i>	110	A
<i>Corriente consumida por motor a un empuje del 75%</i>	56.2	A
<i>Corriente consumida en configuración de Hexa-coptero</i>	660	A
<i>Potencia máxima al 100%</i>	5520	W

<i>T-Motor frame 150 A</i>	<i>Datos</i>	<i>Unidad de medida</i>
<i>soporte de voltaje 14 S</i>	51.8	V

	<i>Datos</i>
<i>Tiempo de vuelo teórico</i>	10 minutos

Número de celdas:

$$\frac{\text{soporte de voltaje del ESC}}{\text{voltaje nominal bateria}} \quad \text{Ec. 4}$$

Fuente: Tomado de apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

$$\frac{51.8 V}{3,7 V} = 13.6 \approx 14 \text{ celdas}$$

Capacidad de la batería (BC):

$$BC = \frac{\text{Tiempo de vuelo} * \text{Corriente max para despegue vertical}}{60} [\text{Amperios/hora}] \quad \text{Ec. 5}$$

Fuente: Tomado de apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

$$\frac{10 \text{Min} * 110 A}{60} = 18.3 \text{ Amperios/hora}$$

De acuerdo con los cálculos anteriores, se eligió una batería compuesta por 14 celdas y una capacidad de 18.3 Amperios.

La batería que cumple con los parámetros establecido es la agras DJI T16 AB3, figura 29. Esta batería tiene una capacidad de 18000mAh y un sistema de voltaje de 14S con el que se reduce el consumo energético. Tiene una carcasa metálica con protección IP54 (resistente al agua / a prueba de polvo). La tabla 12 relaciona las características que presenta dicha batería.



Figura 30. Batería DJI T16 AB3 (reimpresa en línea según referencia)

Tabla 12. Características de la batería DJI T16 AB3

<i>Ficha Técnica</i>	<i>Datos</i>	<i>Unidad de medidas</i>
<i>Tamaño</i>	12.5*7.6*11.9	Cm
<i>Peso</i>	6.4	Kg
<i>Capacidad</i>	18000	mAh
<i>Tensión</i>	51.8	V
<i>Tipo de batería</i>	114S	-
<i>Energía</i>	932	Wh
<i>Rango de temperatura de funcionamiento</i>	-5 ° a 45 ° C - 23 ° a 113 ° F	° C -° f
<i>Rango de temperatura de carga</i>	0 ° a 45 ° C 32 ° a 113 ° F	-
<i>Potencia de carga máxima</i>	2600	W
<i>Tiempo de carga</i>	carga rápida: aprox. 20 Minutos Carga lenta: aprox. 1 hora	-
<i>Ciclos de carga</i>	600	Ciclos

4.10. Estimación de peso con componentes de propulsión

Una vez determinado los componentes de propulsión, se procede a estudiar si los motores son capaces de generar el empuje necesario para el despegue vertical. Se realiza la estimación de peso en general, indicando los componentes, cantidad y peso que hace parte del dron fumigador (tabla 13).

Tabla 13. Componentes, unidades, peso de cada uno en Kg.

<i>COMPONENTES</i>	<i>Unidades</i>	<i>Peso</i>	<i>Unidad de medida</i>
<i>Estructura</i>	1	7.149	Kg
<i>ESC</i>	6	0.63	Kg
<i>Motor</i>	6	10.2	Kg
<i>Hélice</i>	6	1.2	Kg
<i>Batería</i>	1	6.0	Kg
<i>PMU</i>	1	0.1	Kg
<i>Controladora</i>	1	0.2	Kg
<i>Bomba de agua</i>	4	0.8	Kg
<i>Boquilla</i>	8	0.8	Kg
<i>Medidor de flujo</i>	1	0.2	Kg
<i>Tanque de almacenamiento</i>	1	0.5	Kg
<i>Carga útil(pesticida) Max</i>	1	20	Kg
<i>Cámara FPV</i>	1	0.015	Kg
<i>Radar de cobertura 360°</i>	1	0.3	Kg
<i>Tubería agua</i>	4	0.2	Kg
<i>Tornillería y conectores</i>	1	0.1	Kg
Total	48		Kg

El peso bruto (TW)= **48 kg**

El peso bruto de despegue que se deriva de la tabla de estimación de peso es de 48 kg. Se calcula el empuje (T) que debe generar los motores para el despegue vertical del dron.

Datos:

- Total, Peso bruto (TW) 48 Kg
- Relación de empuje/peso (TWR)= 2.0 para vuelos eficientes de 10-15 minutos
- Numero de motores igual a 6

- *Empuje* [Fm]

$$Fm = TW * TWR [Kg]$$

$$48 * 2.0 = 96 [Kg]$$

- Empuje por motor

$$\frac{T}{N^{\circ} \text{ motores}} [Kg]$$

$$\frac{96}{6} = 16 [Kg]$$

De acuerdo con lo anterior, los motores en configuración de hexacoptero deben generar un empuje de 96 Kg para logra la elevación y la estabilidad del UAV.

El motor U15II en combinación con una hélice 40 pulgadas de ancho y un área de barrido del viento de 13.1 pulgadas, cumple con los estándares establecidos para el despegue vertical del UAV. De acuerdo con la ficha técnica del motor en la tabla 7, genera un empuje de 16 kg a una aceleración del 70% para un empuje total de 96 kg en configuración (hexacoptero) sin tendencia a recalentarse.

4.11. Diseño de Brazos

En esta sección se dará solución a la longitud y el material del brazo del dron. El diseño se inicia determinando la longitud de cada uno de los brazos que conformara la estructura. Siguiendo la configuración de hexacoptero, la longitud de los brazos vendrá condicionada por el tamaño de la hélice y configuración del UAV que se debe tener en cuenta para que no colisionen las hélices y su correcta función. De acuerdo con el tamaño de la hélice se realiza un esquema en SolidWorks, determinando la longitud del brazo y la distancia de las hélices como se aprecia en la figura 30, cabe destacar que las medidas expuestas son en milímetros (mm).

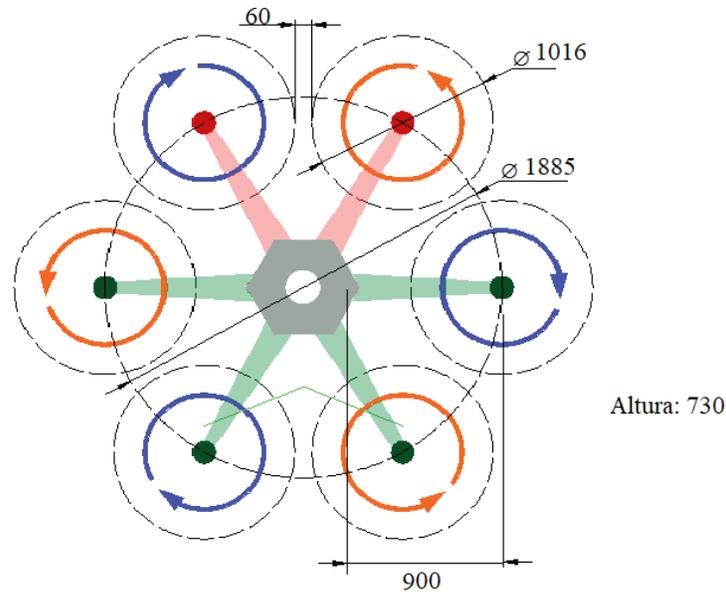


Figura 31. Configuración del UAV y medidas de los brazos, hélices y entre hélices. (autores, hecho en paint)

En la figura 30, se puede apreciar la longitud mínima total entre el centro del dron y el eje de rotación del motor, el cual es de 900 mm y se aprecia una distancia de seguridad de 60 mm para evitar la colisión entre las hélices.

La envergadura del dron es solo dependiente del número de motores y del diámetro de la hélice. En la sección anterior, se determinó que las hélices adecuadas para la configuración de hexacoptero tiene un diámetro de 40 pulgadas. De acuerdo con esta configuración se toma como referencia un hexágono regular el cual su estructura es idéntica a la configuración del hexacoptero, figura 31.

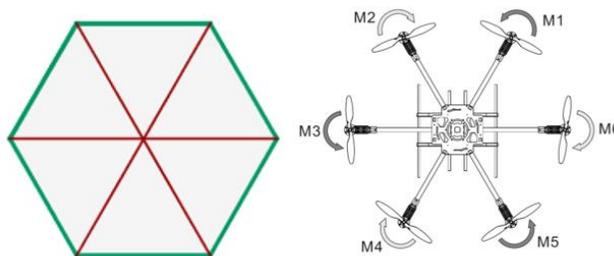


Figura 32. Referencia de la configuración del UAV (Autores)

Por lo tanto, aplicando el área de un hexágono regular (figura 32), ecuación 6, obtenemos la envergadura absoluta del dron.

Datos:

$$L = 900 \text{ mm} \approx 0.9 \text{ metros}$$

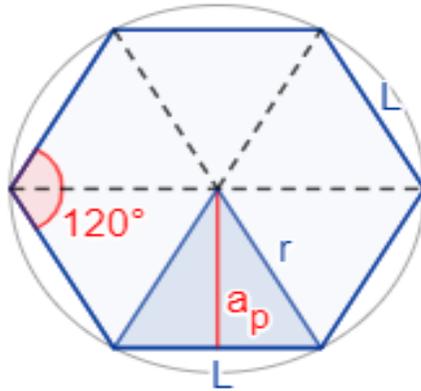


Figura 33. Geometría de un hexágono. (Reimpreso en línea)

$$area = \frac{perimetro \times apotema}{2} \quad \text{Ec. 6}$$

Fuente: Tomado en línea

$$P = 6 * L$$

$$P = 5.4[m]$$

Usando el teorema de Pitágoras para calcular la apotema que determina la altura del triángulo, se obtiene:

$$h = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{Ec. 7}$$

Fuente: Tomado en línea

$$a = \sqrt{0.9^2 - 0.45^2} = 0.77 [m]$$

De acuerdo con la apotema se obtiene:

$$Area = \frac{5.4 * 0.77}{2} = 2.079 [m^2] \quad \text{Ec. 8}$$

Conociendo el área total del dron, se podrá efectuar el análisis a la estructura y momento flector del brazo de acuerdo con los siguientes datos.

4.11.1. Material brazos

Una vez determinado la longitud del brazo y el área del dron, se determinó el material aluminio aeroespacial 6063-T6 para el diseño de los brazos y estructura del dron. La aleación 6063 es una aleación de resistencia media con magnesio y silicio. El aluminio 6063-T6 es tratable térmicamente

y se puede soldar y anodizar fácilmente. Este material es utilizado ampliamente en campos aeroespaciales y la construcción.

4.11.2. Estructura y Momento Flector

Los brazos del UAV deben ser analizados para verificar que sean capaces en soportar el peso del tanque de 20 litros como la fuerza que generan los motores.

Para determinar teóricamente los esfuerzos a flexión, la deflación o deformación del brazo se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros.

La longitud [L] de los brazos, distancia entre el punto de anclaje en la estructura y punto de anclaje del motor donde se origina las fuerzas derivadas por el motor.

- Longitud [L]= 900 mm
- Diámetro exterior = 40 mm
- Diámetro interior = 34 mm

La fuerza de empuje que genera el motor [Fm] hacen que se genere un momento variable en función de la distancia recorrida “x”. en la figura 33 se visualiza la fuerza aplicada en el brazo del dron.

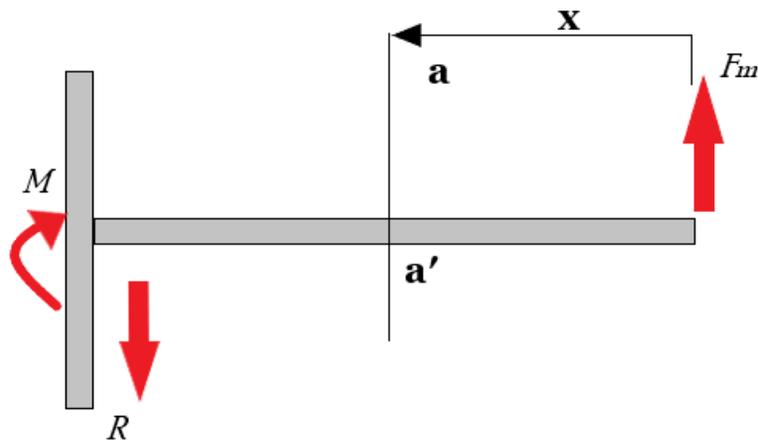


Figura 34. Representación gráfica de momento flector en el brazo del UAV. (Autores, editado en paint)

Donde:

- X= distancia donde se evalúa el momento.
- Fm= fuerza de empuje que genera el motor.
- M= momento en el empotramiento generado por Fm (fuerza de empuje)
- R= reacción generada por empotramiento.

Al tratarse de una configuración de hexacoptero, cada motor genera un empuje de 17.6 Kg (ecuación 2 y 3.)

Mediante la ecuación de estática

$$\sum F_m = 0 \tag{Ec. 9}$$

Fuente: Tomado de (Serrano Cordero Cristian, 2016)

$$F_m - R = 0$$

$$F_m = R \rightarrow R = 16 \text{ kg} \approx 156.91 \text{ N}$$

$$\sum MA = L = 0 \tag{Ec. 10}$$

Fuente: Tomado de (Serrano Cordero Cristian, 2016)

$$MA - F_m * L = 0$$

$$MA = F_m * L = 141.219 \text{ KN} * \text{mm}$$

De acuerdo con los cálculos de reacciones generadas por la fuerza de empuje del motor, se obtienen un momento de 141.219 KN*mm, generado en el empotramiento del brazo al cuerpo del dron. Y el cual se genera una reacción en el empotramiento de 156.91 N, como se muestra en la figura 34.

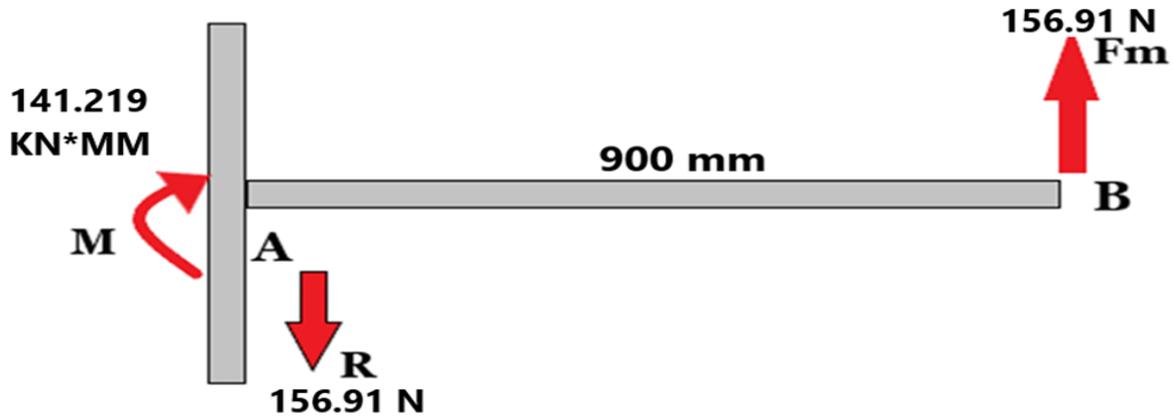


Figura 35. Reacciones generadas por empuje del motor. (Autores, editado en paint)

Para el cálculo de los momentos flectores se determina la sección a-a'. la variable X determina la longitud en la que se realiza el estudio de la sección a-a'.

Donde:

$$Ma - a' = F_m * X \tag{Ec. 11}$$

Fuente: Tomado de (Serrano Cordero Cristian, 2016)

Siendo $0 \leq X \leq L$

Como se trata de una función lineal, el diagrama de flectores quedara determinado por una recta

inclinada, figura 35.

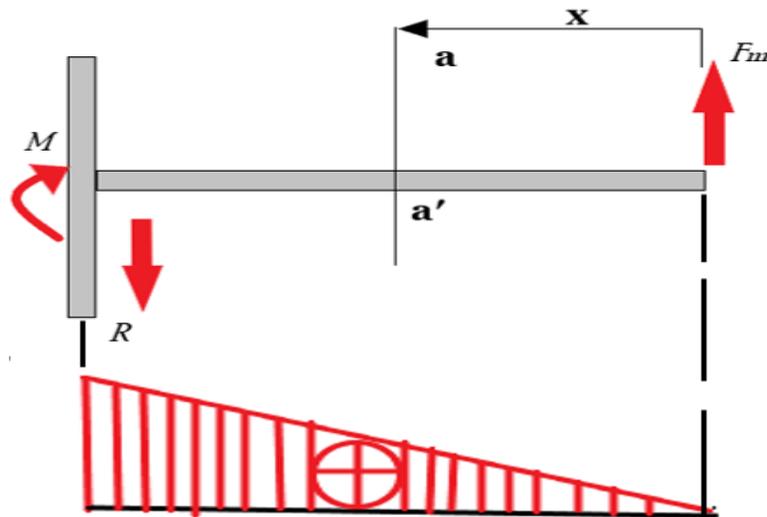


Figura 36. Diagrama de flectores (Autores, editado en paint)

$$X = 0 \rightarrow Fm = 0 = Fm * 0 = 0$$

$$X = L \rightarrow Mx = L = Fm * L$$

$$Mx = L = 141.219 \text{ KN} * \text{mm}$$

De manera similar al caso anterior, su valor mínimo se produce en el extremo del brazo de $141.219 \text{ KN} * \text{mm}$ igual al momento resultante calculado anteriormente.

4.11.3. Distribución de tensiones normales debido al momento flector

Según la ecuación de Navier, se puede encontrar el valor de la tensión de acuerdo con los datos de distancia longitudinal y radial para el caso del tubo.

$$\sigma_{x,y} = \frac{M(x)}{I_z} * y \quad \text{Ec. 12}$$

Fuente: Tomado de (Serrano Cordero Cristian, 2016)

Donde:

- $\sigma_{x,y}$: tensión evaluada a una distancia X y en un radio comprendido entre radio interior y radio exterior.
- $M(x)$: momento flector según la distancia X del punto de aplicación de la fuerza de empuje realizada por el motor.
- I_z : momento de inercia del eje perpendicular Z. supone la resistencia al giro respecto dicho eje que proporciona el elemento estructural.

- y : distancia desde el centro del tubo al exterior, comprendida entre el radio interior y radio exterior.

Se aplica la ecuación 12 cuando $y = \text{radio exterior}$ y $X=L$

$$\sigma_{x,y} = \frac{141.219 \text{ KN} * \text{mm}}{I_z} * R$$

Donde I_z :

$$I_z = \frac{\pi}{4} * (R^4 - r^4) \quad \text{Ec. 13}$$

Fuente: Tomado de (Serrano Cordero Cristian, 2016)

Donde:

- R = radio exterior del tubo
- r = radio interior del tubo

resolviendo la ecuación se obtiene:

$$I_z = \frac{\pi}{4} * (40^4 - 34^4)$$

$$I_z = 961063.45 \text{ mm}^4$$

Agregando los datos a la ecuación 13

$$\sigma_{x,y} = \frac{141.219 \text{ KN} * \text{mm}}{961063.45} * 40 \text{ mm} = 5.877 \text{ MPA}$$

De acuerdo con el resultado, se compara la tensión límite de la fibra de carbón para determinar el factor de seguridad.

$$FS = \frac{\sigma_{x,lim}}{\sigma_{x,max}} = \frac{513}{5.877} = 87.28 \quad \text{Ec. 14}$$

Fuente: Tomado de (Serrano Cordero Cristian, 2016)

El valor de la tensión $F_s = 87.28$ corresponde al valor máximo cuando equivale al radio exterior. Cabe destacar que la distribución de tensiones aumenta progresivamente cuando mayor es el radio el cual se está evaluando la tensión. De acuerdo con la figura 36, se puede visualizar la distribución de tensiones en un eje.

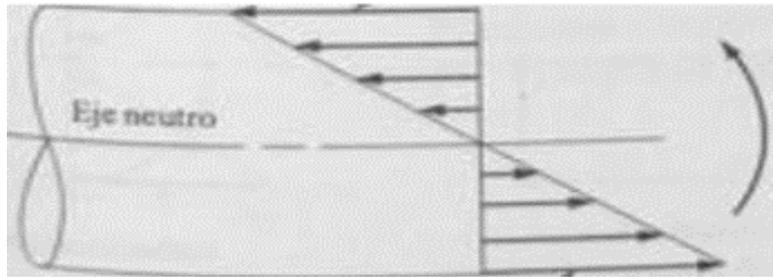


Figura 37. Distribución de tensiones. (Autores, hecho a mano)

4.11.4. Tensión cortante máxima

El valor de la tensión cortante máxima se puede encontrar de acuerdo con la ecuación 15.

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I_z \cdot \Delta z} \quad \text{Ec. 15}$$

Fuente: Tomado de (Serrano Cordero Cristian, 2016)

En donde,

Q = Se conoce como primer momento de inercia.

el valor de Q correspondiente para un tubo es el siguiente.

$$Q = \frac{2}{3} * (R^3 - r^3)$$

Donde:

R =radio exterior.

r =Radio interior

desarrollando la ecuación anterior, se obtiene:

$$\tau = \frac{V * Q}{I_z * \Delta z} \rightarrow \tau = \frac{V * \frac{2}{3} * (R^3 - r^3)}{\frac{\pi}{4} * (R^4 - r^4) * \Delta z}$$

Conociendo que la tensión cortante máxima se sitúa a la altura del eje Z , el cual la tensión normal provocada por el momento flector es nula. El diferencial de Z equivale a dos veces el espesor, por lo tanto, se define de nuevo la ecuación obteniendo:

$$\tau = \frac{V * \frac{2}{3} * (R^3 - r^3)}{\frac{\pi}{4} * (R^4 - r^4) * 2(R - r)} \rightarrow \frac{V * \frac{1}{3} * (R^3 - r^3)}{\frac{\pi}{4} * (R^4 - r^4) * (R - r)}$$

Una vez definida la ecuación, se realizan el siguiente procedimiento:

$$\frac{R^3 - r^3}{R - r} = R^2 + R * r - r^2$$

$$R^4 - r^4 = (R^2 + r^2)(R^2 - r^2)$$

$$\tau = \frac{V \frac{1}{3} R^2 + R * r + r^2}{\frac{\pi}{4} (R^2 + r^2) * (R^2 - r^2)}$$

Conociendo el valor del área de una sección cualquiera del tubo, se puede simplificar la ecuación.

$$\tau = \frac{4}{3} * \frac{V}{A} * \frac{(R^2 + R * r + r^2)}{(R^2 - r^2)}$$

Donde:

V= esfuerzo cortante.

A= área del tubo.

$$\tau = \frac{4}{3} * \frac{141.219}{\pi(40^2 - 34^2)} * \frac{40^2 + 40 * 34 + 34^2}{40^2 + 34^2} = 0.201 \text{ MPA}$$

Se analiza que la tensión cortante máxima es menor que la tensión normal producida por el esfuerzo a flexión. El cual se obtiene un brazo con una mayor resistencia a la flexión.

4.11.5. Deflexión del brazo

Para determinar la deflexión que se produce en un punto del brazo del dron generado por la reacción del empuje del motor, se utiliza el teorema de castigliano, mediante la primera derivada parcial de energía interna de deformación de la estructura.

$$\delta_{max} = \frac{FmL^3}{3EI} \quad \text{Ec. 16}$$

Fuente: Tomado de (Serrano Cordero Cristian, 2016)

Siendo Fm el módulo de Young (fibra de carbono UHM), I la inercia de la sección antes calculada, L longitud del brazo y Fm fuerza de empuje que genera el motor.

Datos:

$$Fm = 141.219 \text{ N}$$

$$E = 69000 \text{ N/mm}^2$$

$$L^3 = 900^3$$

$$I = 961063.45 \text{ mm}^4$$

$$\delta_{max} = \frac{141.219 * 900^3}{3 * (69000) * 961063.45} = 0.5174 \text{ mm}$$

4.12. Cálculo Del Empuje De Los Motores

Datos:

$$\rho = 0.9588 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (densidad altura umbita)}$$

$$V = 80 \text{ rpm}$$

$$D_{prop} = 40 \text{ in} \rightarrow 1.016 \text{ [m]} - \text{diametro helice}$$

$$dm - m = 2.079 \text{ [m]} - \text{distancia entre motores}$$

$$r_p = 0.508 \text{ [m]} - \text{radio helice}$$

$$A_{eff} = \text{Area efectiva.}$$

$$A_{eff} = \frac{1}{2} (dm - m^2) + 3 * \pi * (r_p^2) \quad \text{Ec. 17}$$

Fuente: Tomado de apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

$$A_{eff} = \frac{1}{2} (2.079)^2 + 3 * \pi * (0.508)^2$$

$$A_{eff} = 4.60 \text{ m}^2$$

$$\omega = 80 \text{ rpm} * \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{60 \text{ s}} \right) = 8.377 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad \text{Ec. 18}$$

Fuente: Tomado de apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

$$Vr = 8.377 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * 0.508 \text{ m} = 4.255 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Ec. 19}$$

Fuente: Tomado de apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

$$T = \rho * A * Vr^2 \quad \text{Ec. 20}$$

Fuente: Tomado de apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

$$T = 0.9588 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (4.60 \text{ m}^2) * \left(4.255 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2$$

$$T = 79.85 \text{ N} \approx 80 \text{ N}$$

De acuerdo con el resultado cada motor genera un empuje de 80 [N], el cual genera un empuje total de 480 [N] en configuración de hexacoptero. Es decir, que estos motores son capaces de elevar todo el conjunto ya que, la fuerza resultante de empuje total es mayor que la fuerza generada por la atracción de la gravedad del dron que es igual a 470 [N].

4.13. Cálculo de Velocidad (Horizontal/Vertical)

Datos:

$$\rho = 0,9588 \frac{Kg}{m^3} \text{ (Densidad del Aire umbita – boyaca, altitud 2630 m)}$$

$Cd = 3$ Coeficiente de Drag.

$m = 53$ Kg masa del dron

$g = 9,8 \frac{m}{s^2}$ gravedad

$Aeff = 3.514$ m² Area Efectiva.

$Tr = 2$ ratio empuje/peso.

- **Velocidad Vertical.**

$$Vv = \sqrt{\frac{2 * m * g}{\rho * Cd * Aff}} * \sqrt{Tr - 1} \quad \text{Ec. 21}$$

Fuente: Tomado de (Klaus & Lita)

$$Vv = \sqrt{\frac{2 * 48 \text{ Kg} * 9,8 \frac{m}{s^2}}{0,9588 \frac{kg}{m^3} * 3 * 4.60m^2}} * \sqrt{2 - 1}$$

$$Vv = 8.43 \frac{m}{s} \approx 30 \text{ Km/h}$$

- **Velocidad Horizontal.**

$$Vh = \sqrt[4]{1 - \frac{1}{Tr^2}} * \sqrt{\frac{2 * m * g}{\rho * Cd * Aff}} * Tr \quad \text{Ec. 22}$$

Fuente: Tomado de (Klaus & Lita)

$$Vh = \sqrt[4]{1 - \frac{1}{2^2}} * \sqrt{\frac{2 * 48 \text{ kg} * 9.8 \frac{m}{s^2}}{0.9588 \frac{kg}{m^3} * 3 * 4.60m^2}} * 2$$

$$Vh = 15.69m/s \approx 56 \text{ Km/h}$$

De acuerdo con lo anterior, la velocidad vertical es muy elevada y esto podría ocasionar auto rotación de la aeronave por lo cual debe ser controlada o limitada. Sin embargo, se observa que la velocidad horizontal se encuentra dentro un rango alto de operación lo cual sería una ventaja del diseño. Estos datos pueden variar debido a que no se consideran en la ecuación otras variables que también influyen en la velocidad del dron, tales como la velocidad del viento, las condiciones atmosféricas, por lo que estos valores pueden variar en la práctica, pero aun así se pueden usar de referencia para el análisis teórico del dron.

4.14. Cálculo del Tiempo de Vuelo y Distancia recorrida.

Datos:

Amperaje Batería: 18000 mAh \approx 18 Ah

Consumo Motores al 100%: 110 A

Consumo Motores al 75%: 56.2 A

$$T_{min} = \frac{\text{AmperajeBateria(A)}}{\text{Consumo motores(A)}} * 60 \text{ min} \quad \text{Ec. 23}$$

Fuente: apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

Tiempo de vuelo con motores al 100% de operación

$$T_{min} = \frac{18Ah}{110Ah} * 60 = 9.8 \approx 10 \text{ minutos}$$

Tiempo de vuelo con motores al 75% de operación

$$\frac{18Ah}{56.2Ah} * 60 = 19.2 \approx 19 \text{ minutos}$$

Tiempo de vuelo real

$$E_{fi} = \frac{3,3}{4,2} * 100 = 78\% \quad \text{Ec. 24}$$

Fuente: apuntes de clase aeronaves no tripuladas.

Tiempo de vuelo real con propulsión al 100%.

Tiempo de vuelo * eficiencia = Tiempo de vuelo real

$$0,78 * 10\text{minu} = 7.8 \approx 8 \text{ minutos}$$

Tiempo de vuelo real con propulsión al 75%.

$$0,78 * 19 \text{ minu} = 14.8 \approx 15 \text{ minutos}$$

El dron fumigador presenta y proporciona un tiempo de operación de 8 minutos con motores al 100% de funcionamiento y 15 minutos con motores al 75% de funcionamiento. De acuerdo con el motor que se seleccionó este opera a un 75%. Es decir, que el dron tiene un tiempo de 15 minutos de operación el cual brinda una mayor eficiencia.

Distancia recorrida por UAV.

$x = \text{Distancia recorrida por uav}$

$v_{h75\%}$: Velocidad horizontal al 75%

$t_{75\%}$: Tiempo de la batería con los motores al 75%

$$\begin{aligned}x &= v_{h75\%} * t_{75\%} \\x &= 15.69 \text{ m/s} * (14.8\text{min} * 60) \\x &= 13932.72\text{m}\end{aligned}$$

Fuente: Formulas de movimiento rectilíneo uniforme

Esta sería la distancia a la cual el UAV estaría capacitado a recorrer de forma óptima, por ende, alcanzaría a cubrir una superficie de 130m^2 .

4.15. Simulación Software Xcalc Copter

Una vez seleccionado los componentes de propulsión y la configuración del UAV, es difícil simular el comportamiento que tendrá el hexacoptero. No obstante, existe una herramienta que combina el cálculo de todo los componentes de propulsión, al introducir los parámetros de los distintos módulos nos da una visión aproximada del comportamiento final del UAV. Esta herramienta Xcalc Copter es un servicio web desarrollado por Markus Mueller. Los datos de esta herramienta no son exactamente precisos, es una guía para intuir si el diseño propuesto es viable, los datos reales solo podrán verse una vez montado el UAV.

Para validar si se hizo una correcta elección de los componentes de propulsión, se procede a utilizar el simulador Xcalc Copter para poder obtener el diseño final de la aeronave. obteniendo como

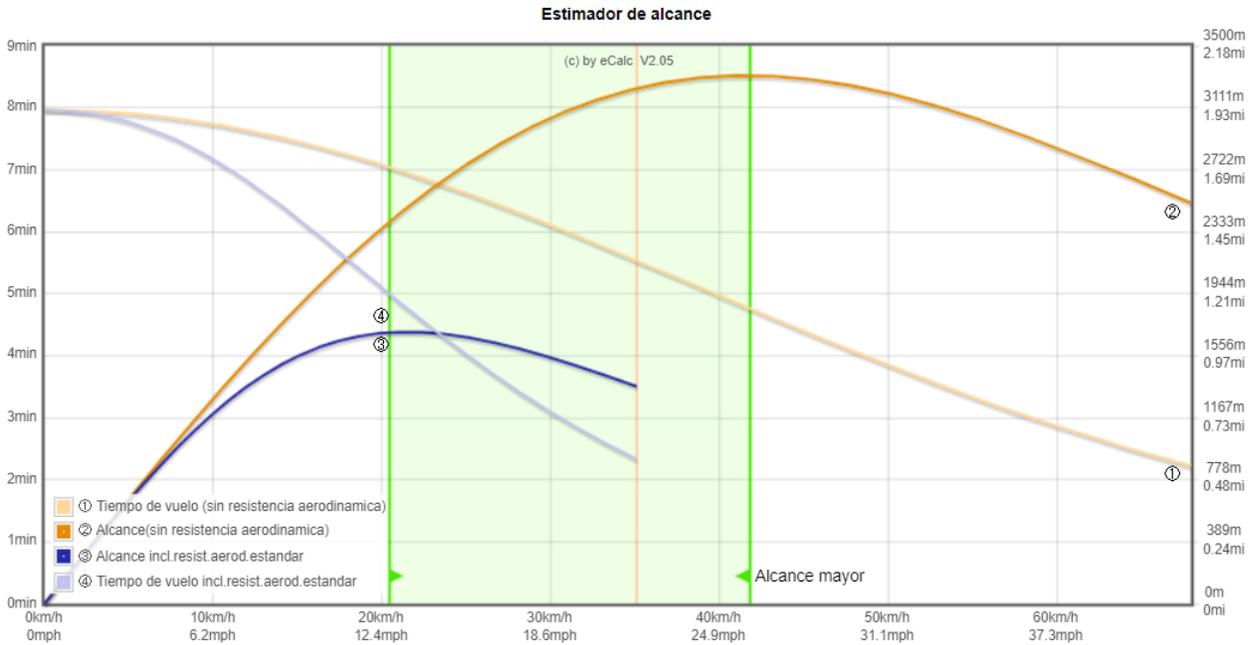


Figura 39. Gráfico datos de simulación XcopterCalc estimador de alcance (Autores)

En la Figura 38, se puede observar que el dron está volando en condiciones reales de viento y temperatura ambiente. De acuerdo con lo anterior, se observa que el dron tiene un tiempo de vuelo de 8.2 minutos a una velocidad máxima de 43 km/h. Bajo esta condición el dron va a descender hasta 0.60 millas a una velocidad de 35 km/h. La línea naranja representa un ascenso de 0 a 44 km/h con un alcance mayor de 8 minutos de vuelo sin resistencia aerodinámica.

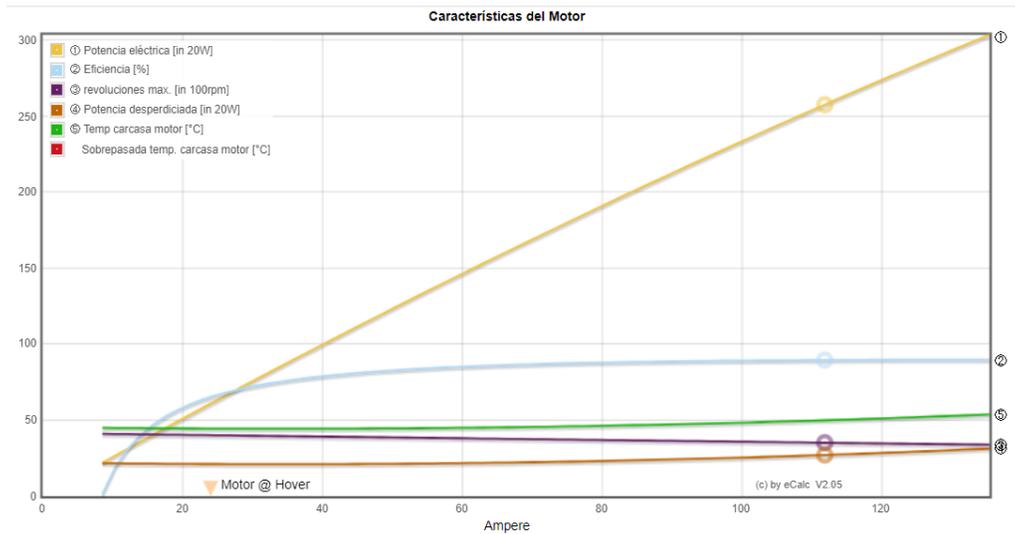


Figura 40. Gráfico de simulación XcopterCalc características del motor (Autores)

En la figura 39, se observa todas las características del motor, el cual alcanza un nivel aceptable de funcionamiento eficiente. Este motor tiene una eficiencia del 90%. La temperatura no es crítica y el nivel de potencia se acerca al límite.

De acuerdo con las gráficas anteriores y teniendo en cuenta las características de cada uno de los componentes de propulsión, se ha hecho una correcta elección de estos componentes conforme a la simulación realizada. Según los cálculos teóricos, la combinación de estos componentes y la configuración de hexacoptero podrá ofrecer las características que requiere el proyecto.

4.16. Diseño en SolidWorks

4.16.1. Selección de tanque para carga paga

El diseño del recipiente de plástico de 20 litros (figura 40) se seleccionó después de una investigación y un estudio detallados sobre muchas opciones disponibles según la línea base. El recipiente seleccionado está hecho de polietileno de alta densidad (HDPE); ya que es considerablemente resistente y económico en los plásticos disponibles, que también es compatible con la mayoría de los productos químicos utilizados en los pesticidas. El contenedor de HDPE tiene una entrada amplia para un llenado rápido y fácil de líquido y una salida pequeña para la conexión de la manguera. El diseño del contenedor proviene de un fabricante de renombre.

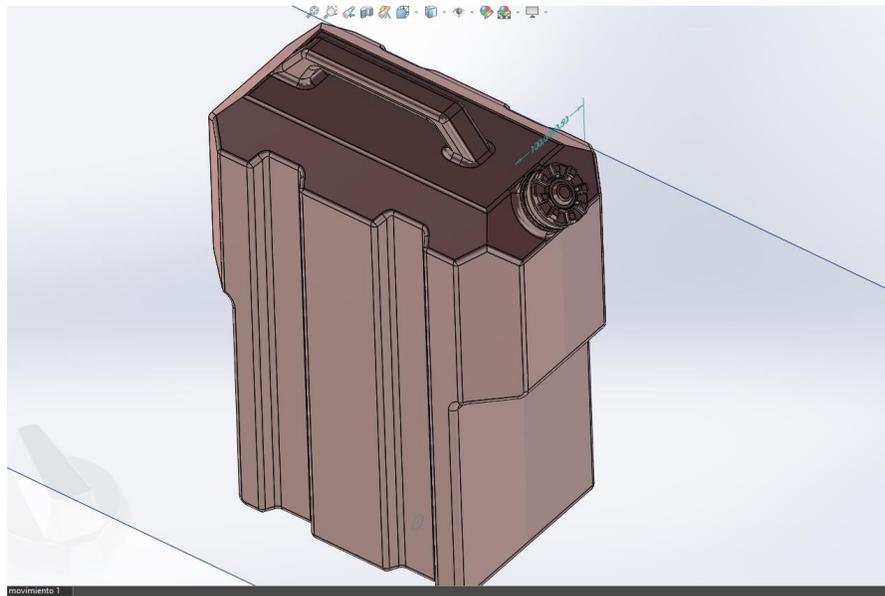


Figura 41. Diseño aproximado en SolidWorks del tanque de 20L (Autores)

4.16.2. Diseño en SolidWorks del UAV

La parte más crítica del desarrollo fue el diseño de la estructura del UAV del diseño propuesto; esto nos permitió considerar el factor de seguridad al seleccionar los componentes de la estructura del UAV. Esto implicó el diseño del núcleo central del dron, el diseño de brazos para motores, el diseño del soporte del motor y el diseño del tren de aterrizaje (figura 41).

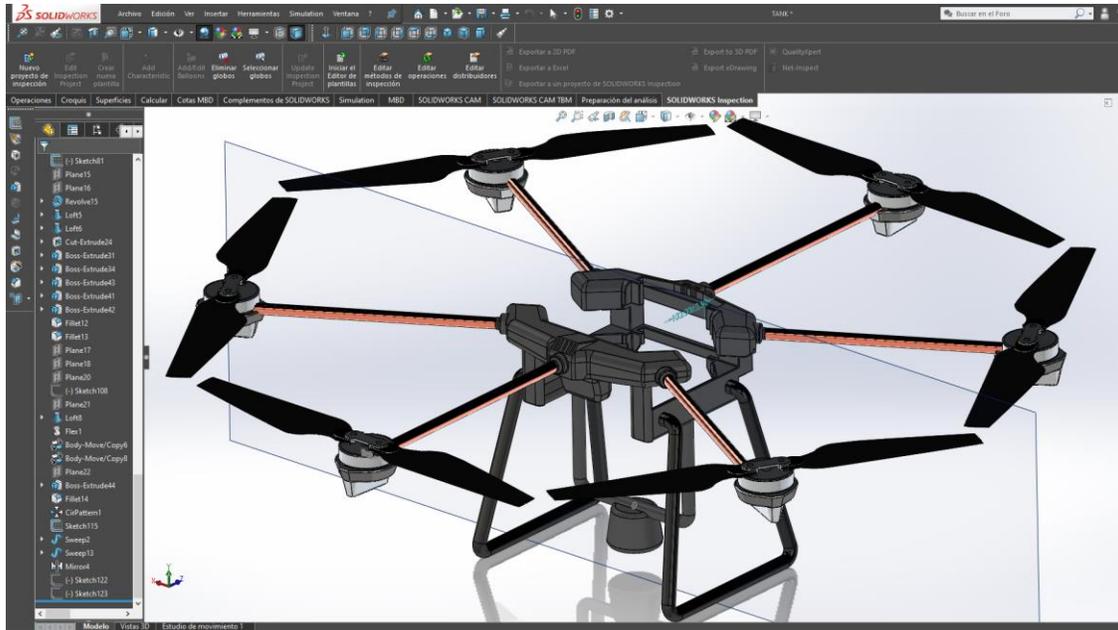


Figura 42. Diseño en SolidWorks del UAV fumigador. (Autores)

En caso de hacer el diseño del prototipo real se consultó y seleccionó diferentes materiales aeroespaciales, a saber, laminados de sarga de fibra de carbono, aluminio de grado aeroespacial 6063-T6 (figura 42) y acero de aleación de acero inoxidable de grado SAE304 que se caracterizan por su uso en la industria aeronáutica dada su resistencia, dureza y peso ligero.

Material

Propiedades Tablas y curvas Apariencia Rayado Personalizado Datos de apl

Propiedades de material
No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Guardar tipo de modelo en la biblioteca

Unidades: SI - N/mm² (MPa)

Categoría: Aleaciones de aluminio

Nombre: 6063-T6

Criterio de fallos predeterminado: Tensión de von Mises máx.

Descripción:

Origen:

Sostenibilidad: Definido

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	69000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante	25800	N/mm ²
Densidad de masa	2700	kg/m ³
Límite de tracción	240	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	215	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	2.34e-05	/K
Conductividad térmica	209	W/(m·K)

Aplicar Cerrar Guardar Config... Ayuda

Figura 43. Propiedades del aluminio aeroespacial 6063-T6 (Autores)

El principal factor para la selección de este material fue por sus propiedades mecánicas, tiene una la densidad de 2700 kg/m³ y módulo de elasticidad de 69000 N/mm². Considerando que la estructura debe soportar un peso de aproximadamente 48kg, se determinó que estas características mecánicas son suficientes para la estructura del UAV. por sus características de tratamiento térmico de solución (1), temple (1) y maduración artificial. Aplicado a los semi-productos que después de un tratamiento de solución temple brusco y maduración artificial mejoran sus propiedades mecánicas.

En la figura 43 se muestra las propiedades físicas del diseño tomando en cuenta que todo el cuerpo está constituido del material aluminio aeroespacial 6063-T6

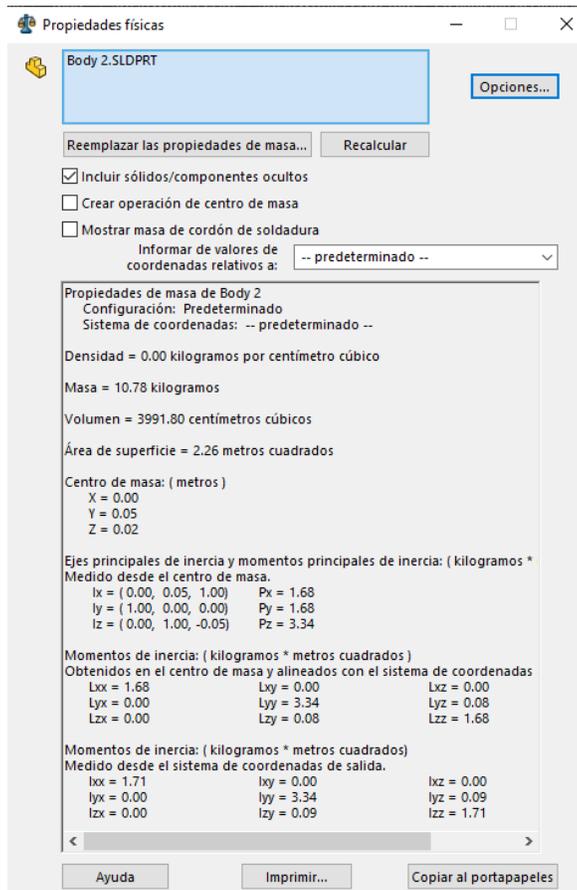


Figura 44. Propiedades físicas del diseño en SolidWorks (Autores)

Núcleo central: El núcleo central está formado por placas horizontales, tres en la parte frontal dron y dos en la parte posterior que presentan la forma de un hexágono con un corte en medio el cual permite ser el soporte del tanque de almacenamiento. Las placas se unen entre sí con pequeñas columnas redondas que las atraviesan de abajo hasta arriba, para darle firmeza y resistencia a la estructura, figura 43. El modelado para el estudio de la estructura en SolidWorks se realizó con el material aluminio de grado aeroespacial 6063-T6. Las separaciones entre placas permiten el espaciado para alberga toda la electrónica y para la batería un agujero en la parte posterior de medidas 260x86 mm.

A continuación, se muestra la figura 44 que es el esqueleto central del diseño en SolidWorks, parte más relevantes del dron por la distribución de carga y almacenamiento de los componentes adicionales.

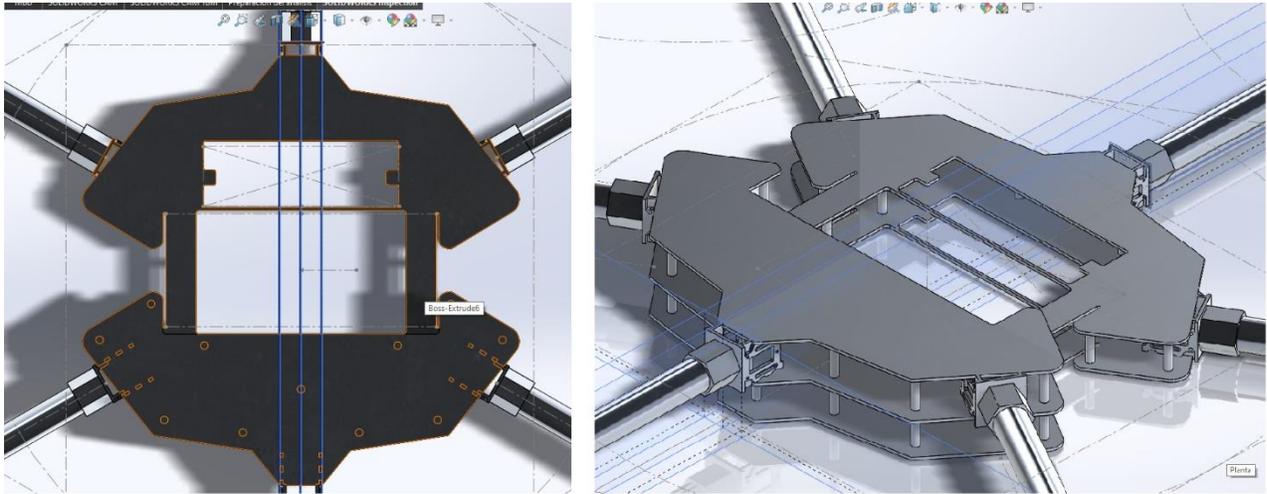


Figura 45. Planta del modelo y vista trimétrica y en SolidWorks (Autores)

Brazos plegables: los seis brazos que divergen normalmente a cada cara plana del hexágono con una longitud de 900 mm y un diámetro exterior de 40 mm y están soportados por una bisagra empotrada de Aluminio 6061-T6. Para fines de elaboración física, se consideró una bisagra plegable con un ángulo de plegado de hasta 60 grados. El plegado se acomoda para reducir el espacio para almacenar y transportar el UAV, que es desenroscando un solo tornillo de aluminio. Se estimó el peso del brazo plegable, incluida la bisagra de aluminio y el soporte del motor, es de 1 kg.

Tren de aterrizaje: El diseño del tren de aterrizaje, enfocado en el centro de gravedad del ensamblaje completo. El material utilizado es un tubo de aleación de acero inoxidable de grado SAE 304. Los trenes de aterrizaje están diseñados para montarse en un soporte mecanizado de aluminio 6061-T6 montado en la parte inferior de la placa base del núcleo central. La orientación del tren de aterrizaje se inclinó para absorber los impactos del aterrizaje hacia el centro de la estructura del avión, donde es más rígido. El peso del tren de aterrizaje incluido el soporte de aluminio es de 4 kg.

Diseño de montaje de la carga útil en el núcleo central: la carga útil se diseñó inicialmente para el montaje en barandillas, pero debido a los requisitos de piezas complejas y la cantidad de piezas de conexión, se cambió al diseño de jaula de tubo. La jaula de carga útil está diseñada con tubos cilíndricos huecos de acero inoxidable de grado SAE304 que coinciden con el perfil del recipiente de líquido. El diseño limitó el peso de la jaula de acero a 2 kg con los sujetadores.

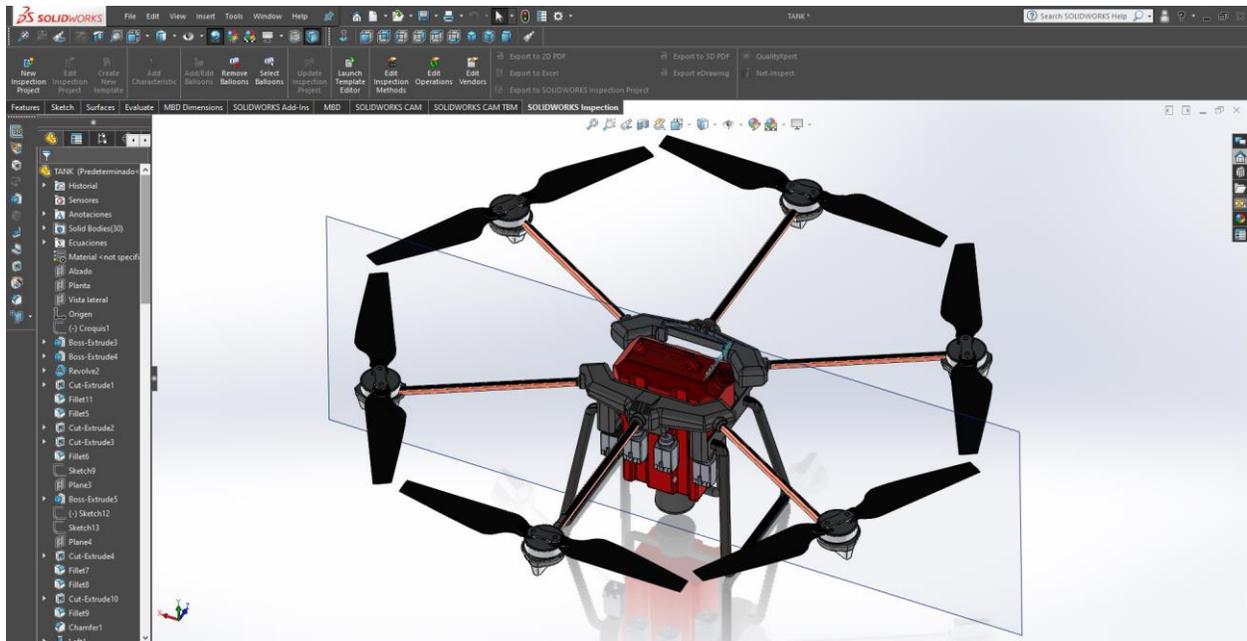


Figura 46. Vista preliminar de la estructura y diseño visual del dron (Autores)

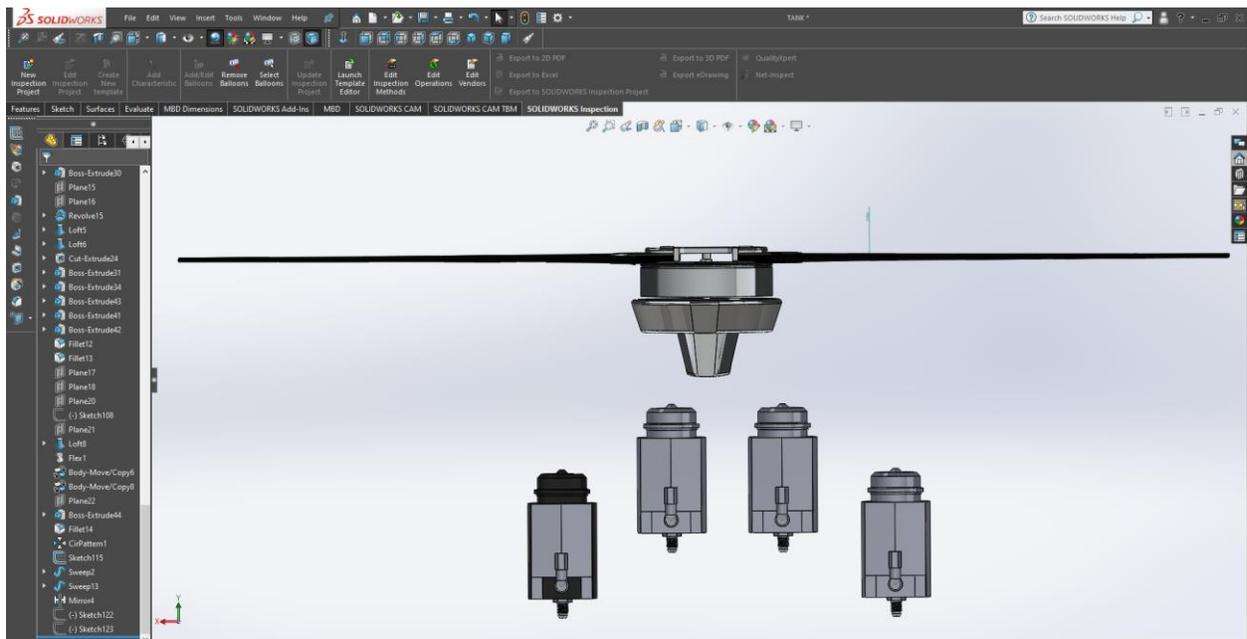


Figura 47. Vista de motores y bombas de presión (Autores)

Las figuras 45 y 46 Muestran más detalles de la configuración del UAV con sus componentes principales como la ubicación del tanque para la carga paga, las hélices, motores, bombas de presión para la expulsión del líquido fitosanitario, el aspersor en la parte baja del UAV, el soporte de tierra y el espacio asignado para la batería de este.

4.16.3. Análisis general de costos

Para fines de realización y fabricación del prototipo se expone la tabla 14 en la cual se evidencia el costo total y aproximado de cada componente por separado a fecha de 6 de diciembre de 2021.

Tabla 14 Costo según componente.

Componente	Unidades	Precio unitario (Pesos colombianos)	Precio total
Batería	1	\$ 5.726.164	\$ 5.726.163,59
Bomba de agua	4	\$ 572.616	\$ 2.290.464,00
Boquilla XR11001VS	8	\$ 41.000	\$ 328.000,00
Cámara FPV	1	\$ 1.074.900	\$ 1.074.900,00
Controladora	1	\$ 1.585.707	\$ 1.585.707
Estructura	1	\$ 9.777.450	\$ 9.777.450,00
Hélices	6	\$ 1.752.119	\$ 10.512.714
Medidor de flujo	1	\$ 370.000	\$ 370.000
Motores	6	\$ 2.698.576	\$ 16.191.457
PMU	1	\$ 625.757	\$ 625.757
radar de cobertura 360°	1	\$ 3.832.760	\$ 3.832.760
Tanque de almacenamiento	1	\$ 821.306	\$ 821.306
Tubería	4	\$ 20.000,00	\$ 80.000
TOTAL	36	\$ 28.898.354,67	\$ 53.216.678,87

4.17. Análisis Estático De La Estructura Del UAV En SolidWorks

4.17.1. Preparando el esqueleto del UAV para la simulación

Para realizar el análisis de elementos finitos, es importante definir todas las fuerzas que actúan sobre el marco. El peso de la estructura y todos los componentes (Tanque con carga paga, pulverizadores, ESP, módulo GPS, controlador de vuelo, peso de los motores, batería, antena, hélices y cámara) es normal al suelo. La carga estática implica un estudio estático para calcular la respuesta de los cuerpos sobre los que se aplican cargas de forma estática o lenta. Para la simulación, es muy importante ubicar las fuerzas según su ubicación (peso de cada componente en la estructura y empuje de motores) a las cuales será sometido el dron de forma teórica, logrando coordenadas de SolidWorks dentro de la estructura donde éstas se aplican. La figura 47 presenta el posicionamiento para todas las cargas. Las flechas moradas denotan la fuerza ejercida normal al plano terrestre de la sumatoria de todos los componentes que soportará la estructura del UAV, $48\text{kg}=470\text{N}$. Y las verdes, el empuje total ejercido por los cuatro motores al mismo tiempo, $80\text{N}\cdot 6= 479\text{N}$. De este modo se definieron las cargas y fuerzas a las cuales será sometido la estructura en su teoría y cálculo. Para estas cargas se utilizará la función “fuerzas o cargas externas”, la figura 46 expone la función de SolidWorks “Asesor de cargas” y un menú desplegable, seleccionamos “Fuerza”.

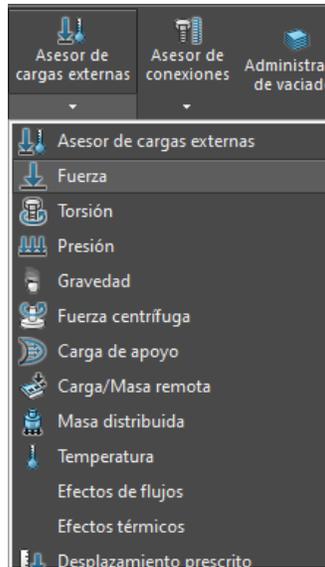


Figura 48. Posicionamiento de las cargas. (Autores)

La figura 47 muestra el menú de parametrización de la opción “Fuerzas o cargas externas” en el cual se selecciona la opción “Fuerza”, luego en el cuadro azul demarcado, figura 48, solicita la cara de la estructura en la cual se va a aplicar la fuerza. Con el cursor, se seleccionan principalmente las dos primeras placas de la estructura contando de abajo hacia arriba, figura 49.

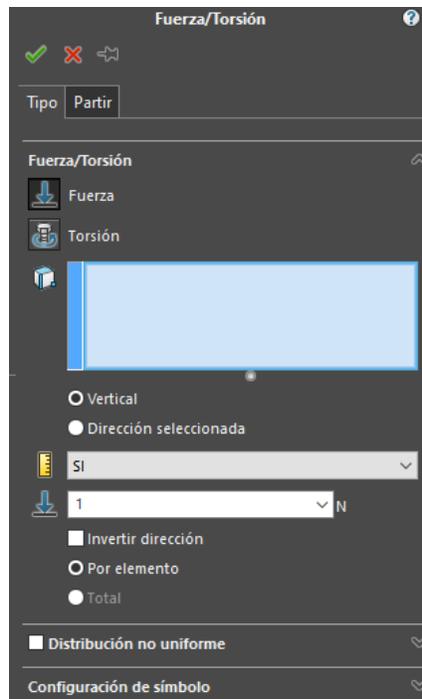


Figura 49. Menú de parametrización de fuerzas en SolidWorks (Autores)

La figura 52 muestra la ubicación de las flechas moradas las cuales se les asigna un valor de 470N, seleccionando “Total” en la ventana de parametrización para que así el programa reconozca que es en total de la superficie la distribución de la fuerza. Se selecciona la palomilla color verde para terminar. Este mismo procedimiento se repite con el empuje de los motores, pero seleccionando la cara inferior del estante para los motores, en la figura 53 se observa con flechas color verde.

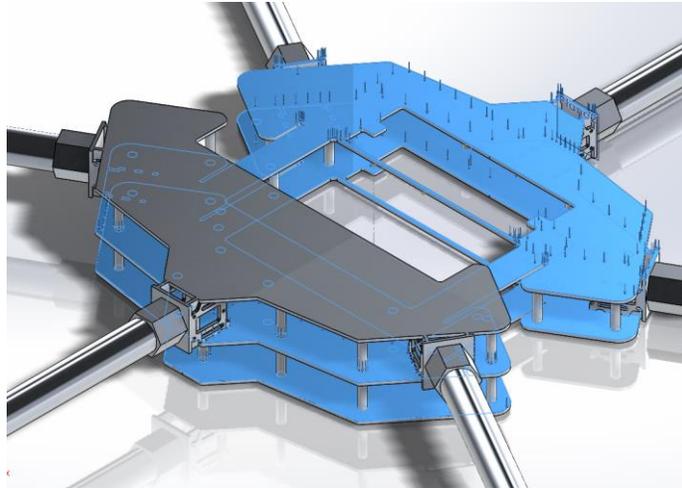


Figura 50. Visualización de la fuerza aplicada en las placas centrales de la estructura del UAV (Autores)

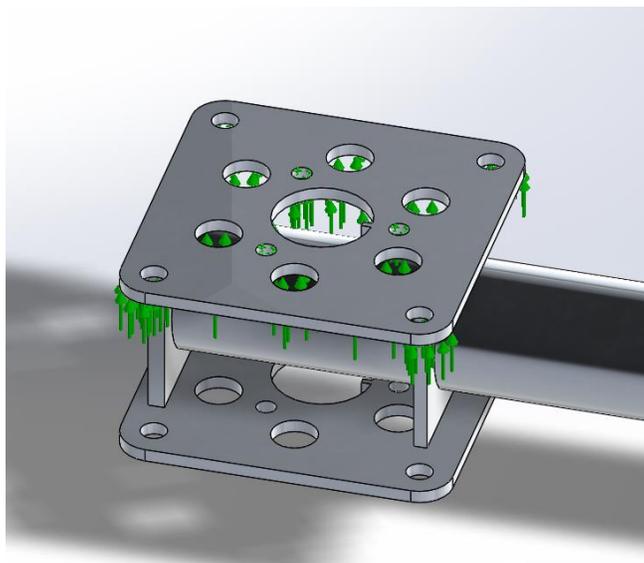


Figura 51. Visualización de la fuerza aplicada en la placa sujetadora del motor (Autores)

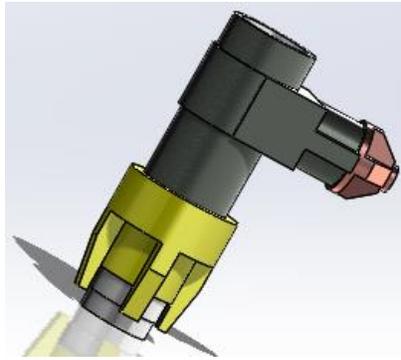


Figura 52. Boquilla de pulverización (Autores)

A continuación, se procede a enmallar la estructura del UAV. La figura 52 muestra el cuadro de parametrización y selección de la malla más adecuada para el estudio y análisis. La Opción “Crear malla y ejecutar” crea de forma automática la malla, figura 53; que más se adapte al sólido y una vez terminado el mallado, procede a ejecutar el análisis y estudio de las fuerzas en la estructura.

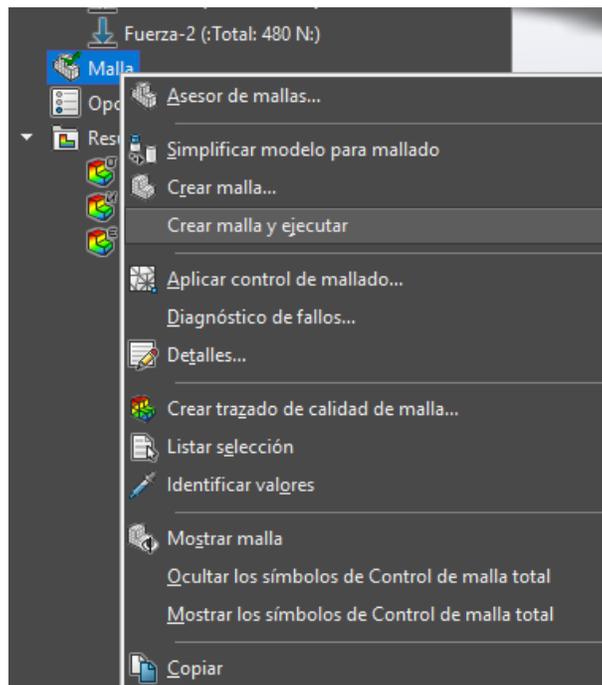


Figura 53. Cuadro de Opción de mallado y ejecutar el análisis en SolidWorks (Autores)

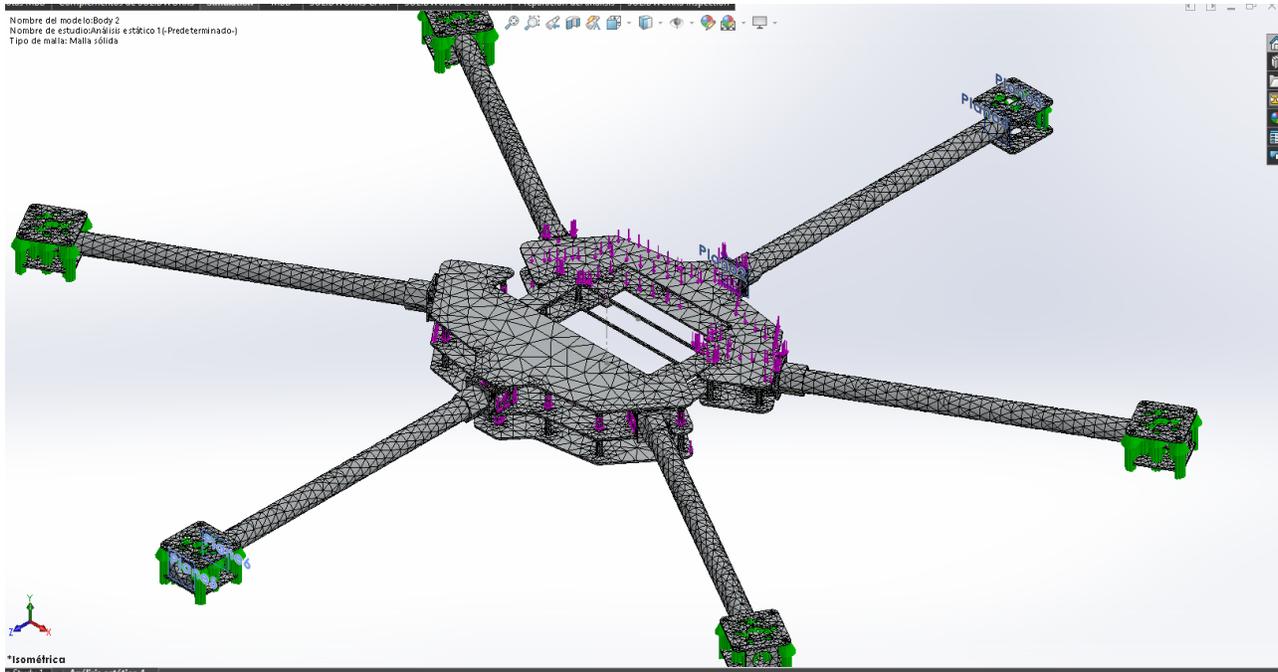


Figura 54. Visualización del mallado en SolidWorks de la estructura del UAV (Autores)

4.17.2. Los resultados del análisis

El siguiente paso se denomina posprocesamiento. En esta parte, después del mallado, se generan imágenes correspondientes a los resultados del análisis, específicos de los casos de análisis estático, a saber, Estrés de Von Mises (figura 54), que se utiliza para medir el nivel de esfuerzo y Desplazamiento (figura 55) utilizado para medir la deflexión máxima. La zona más deformada es el centro del dron.

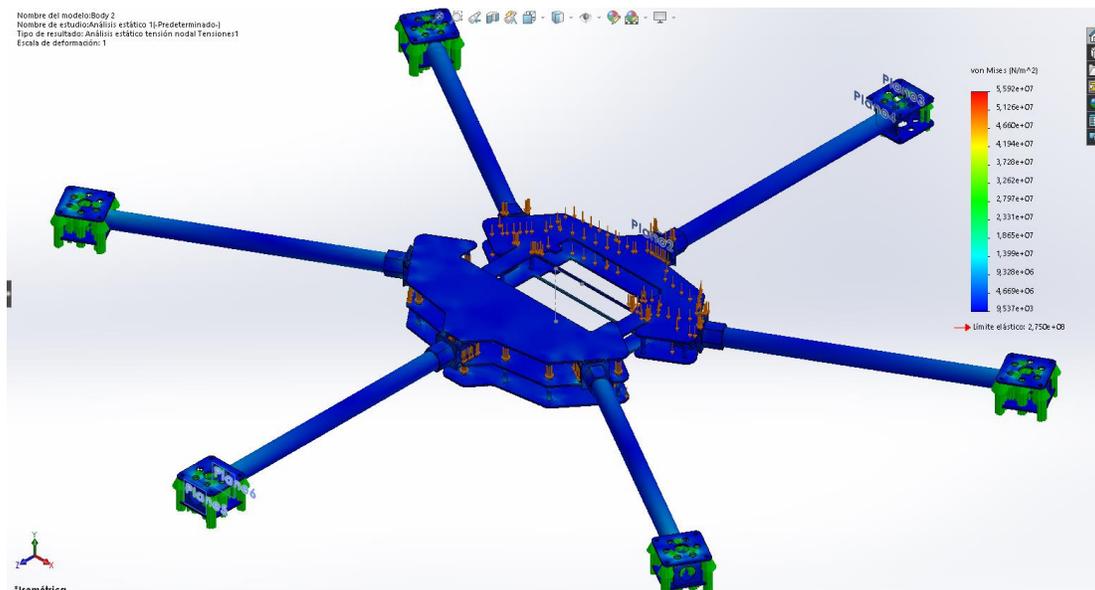


Figura55. Simulación en SolidWorks de la estructura en tenciones de Von Mises (Autores)

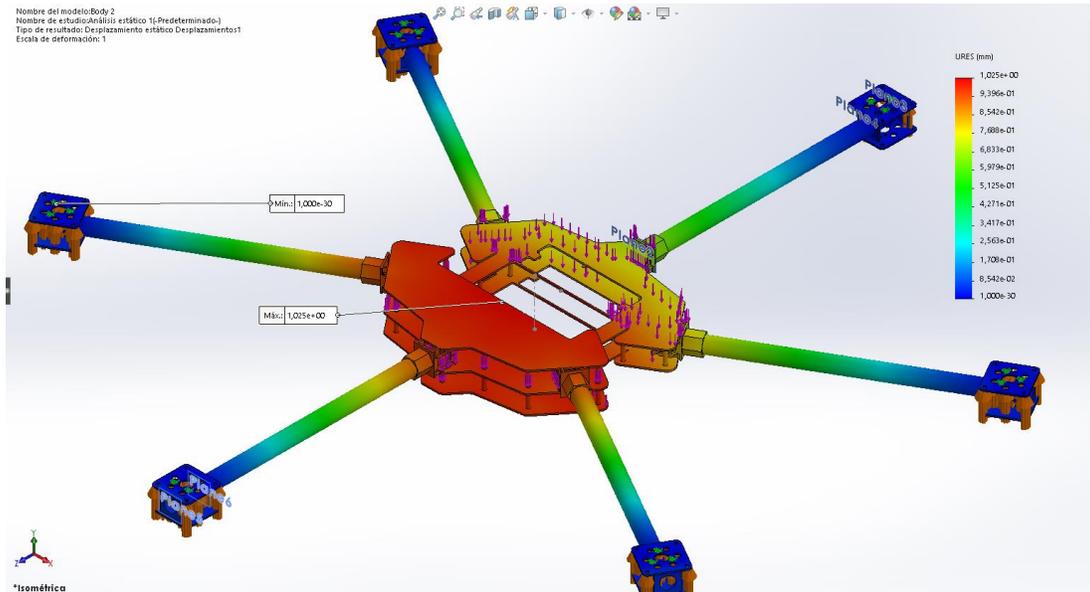


Figura 56. Simulación en SolidWorks de la estructura de los desplazamientos por análisis estático (Autores)

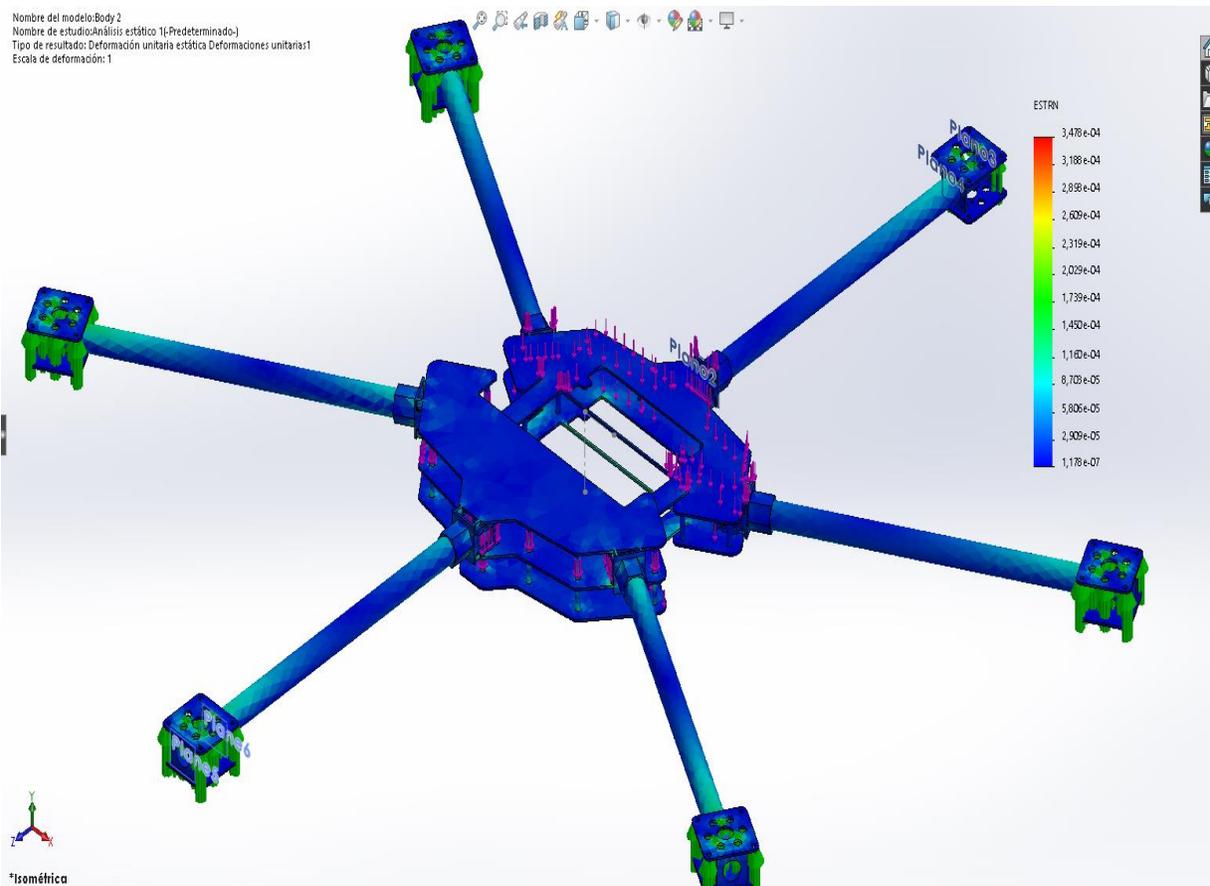


Figura 57. Simulación en SolidWorks de la estructura del UAV con respecto a las deformaciones (Autores)

4.18. Simulación de Mission Planeer

Para efectuar la simulación de este proyecto se realizó la selección del simulador Mission Planner con el fin de establecer adecuadamente las trayectorias de fumigación en los cultivos de papa. Este simulador es una aplicación de estación de tierra con todas las funciones para el proyecto piloto automático de código abierto APM y se puede utilizar como complemento de control dinámico del dron. Estas son algunas de las características que Mission planner puede realizar:

- Planificar, guardar y cargar misiones autónomas en que el piloto automático con entrada simple manera de punto de apuntar y hacer clic en Google o en otros mapas.
- Descargar y analizar los registros de la misión creados por su piloto automático.
- Supervisar el estado de su vehículo mientras está en funcionamiento.
- Registros de telemetría Record que contienen mucha más información de los registros de los pilotos automáticos a bordo.
- Ver y analizar los registros de telemetría.
- Operar su vehículo en FPV (vista en primera persona)

Para identificar el punto de ampliación se utiliza coordenadas longitudinales y latitudinales; este proceso se realiza en diferentes fases, descritas a continuación.

4.18.1. Delimitación del punto de partida

La delimitación del punto de partida consiste en realizar un determinado cercado para encerrar la zona donde se desea realizar la fumigación. Por medio de las coordenadas Google satellite Map, se obtiene las coordenadas de los vértices que delimitan la zona.

Para la simulación se seleccionó un área de 6.404 m² en cultivo de papa ubicado en el municipio de Úmbita-Boyacá en la vereda chuscal. En la figura 56. Por medio de Google satellite Map se miden diez coordenadas las cuales presentan los vértices de la zona deseada y un punto H de partida y llegada del dron. Para estas coordenadas, el sistema traza unas líneas imaginarias formando un polígono, luego, calcula la distancia y el ángulo entre cada uno de los puntos de acuerdo con la altitud del dron. Figura 57



Figura 58. Mapa de la zona escogida para el ejemplo de la planificación de la misión (Autores)



Figura 59. Recorrido de fumigación. (Autores)

De acuerdo con lo anterior, se establece el enmallado con una distancia de 2 metros entre las líneas imaginarias, a una velocidad de 5 m/s, una altitud de vuelo de 5 metros de operación y una altitud de ascenso de 15 metros en el punto de salida para después ir descendiendo paulatinamente hasta llegar a la misión, en la cual se estableció la altura máxima de operación. Figura 58. Teniendo esta información se obtiene que el proceso de vuelo tiene un tiempo de 12 minutos de recorrido con una distancia de 2.85 Km en un área de 6402 m². Con los datos anteriores se realizan la planeación del vuelo del hexacoptero, configurando el Mission Planner para la misión.

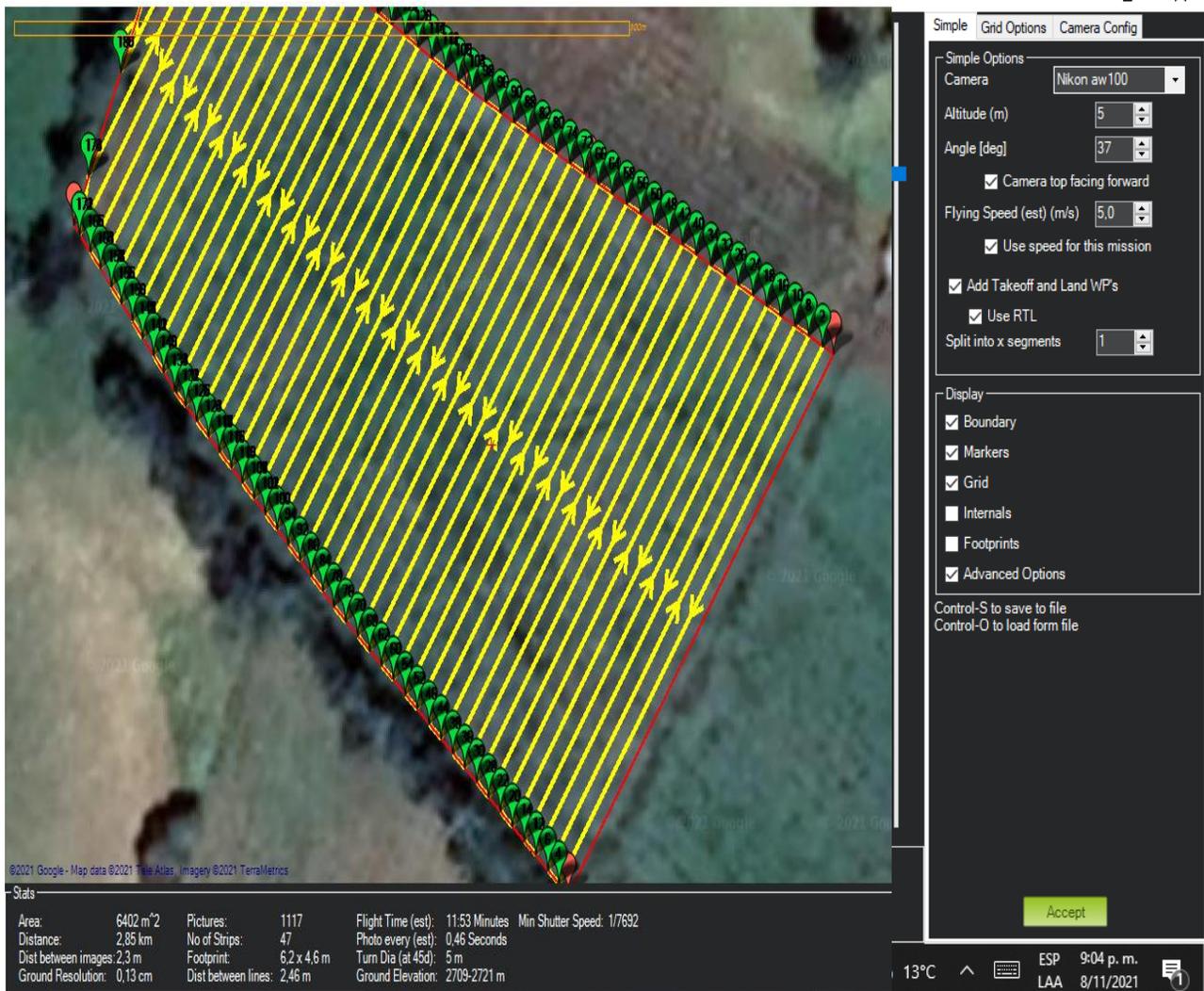


Figura 58. Establecimiento del enmallado con la velocidad (Autores)

Se selecciona la configuración simulación y se configura el modelo en modo (hexacoptero) e iniciamos la simulación. Para ello se requiere que el dron se encuentre en modo GUIDED, luego se selecciona la pestaña de acciones, se selecciona configuración de MISSION STAR, luego el botón CONFIGURAR EL MODO, botón ARM, y por último seleccionamos la opción HACER ACCIÓN para iniciar la misión de fumigación.

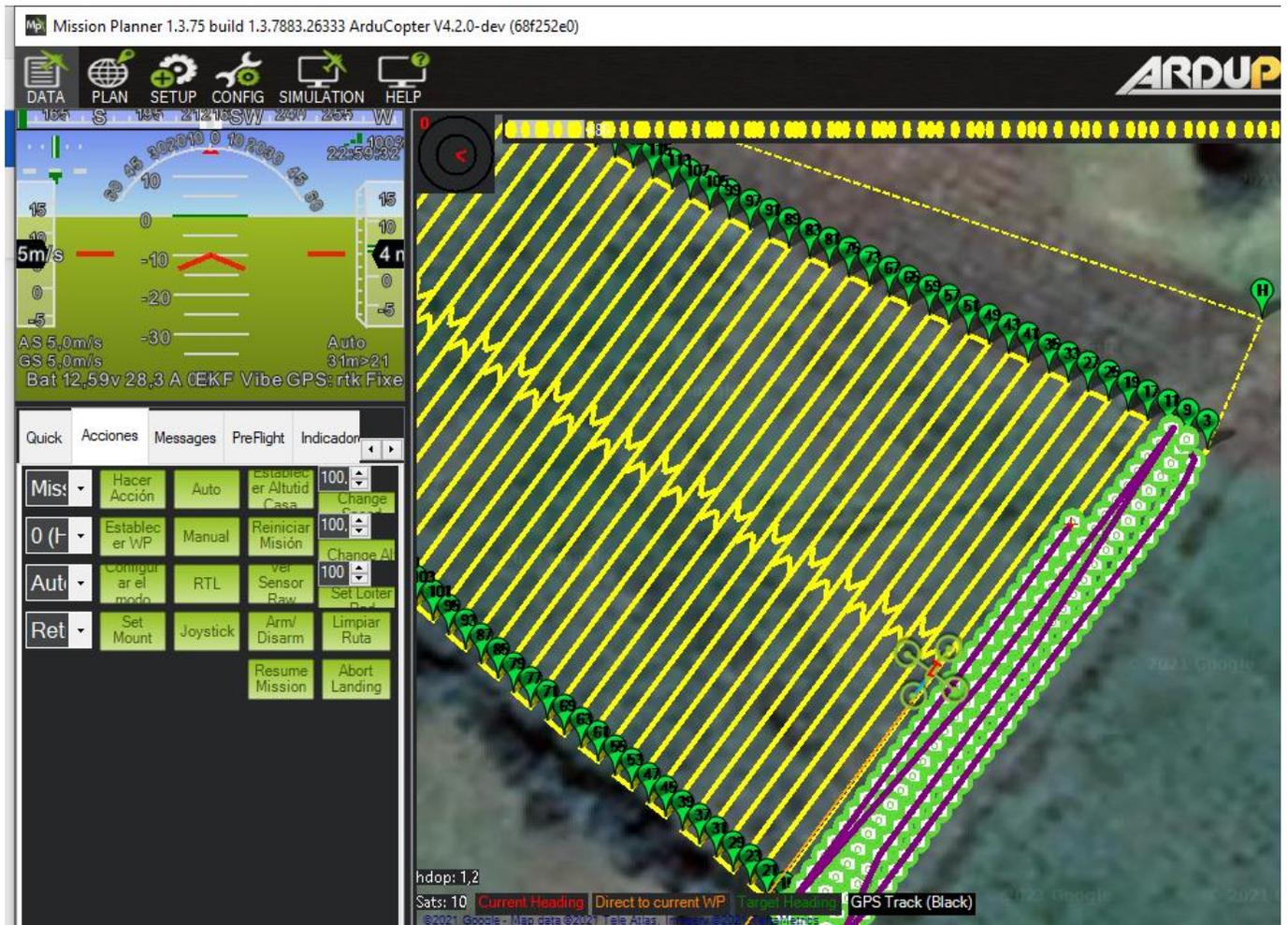


Figura 59. Proceso de fumigación. (Autores)

Después del proceso de fumigación el dron vuela a su punto inicial a una altitud de 15 metros. La agilidad para realizar la misión depende mucho de las condiciones climáticas que pueden presentarse durante el proceso de fumigación. De igual manera el software permite una mayor movilidad y maniobrabilidad para efectuar los diferentes tipos de misión propuestos

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

- El diseño del hexacoptero fumigador, permite maximizar el rango de fumigación para el cultivo de papa y permite minimizar los tiempos de fumigación, así como disminuir la carga laboral y el contacto directo con los productos fitosanitarios.
- Se hizo el reconocimiento de aproximadamente de 29 plagas y enfermedades que atacan directamente a los cultivos de papa, además, los métodos de fumigación más utilizados por agricultores de bajos recursos son fumigadora estacionaria y fumigadora manual; los cuales son los usados para mitigar el ataque de las mismas, a pesar de exponer mucho la salud del jornalero.
- De acuerdo a las características seleccionadas en línea base para UAV con sistemas de pulverización equipado y los cálculos efectuados se obtuvo una autonomía de vuelo para el UAV de 15 minutos con motores al 75% de operación y con una batería de 18000 mA/hora, lo cual permite el recorrido de los $130m^2$ (metros cuadrados) del área propuesta.
- Al iniciar la configuración de vuelo en el simulador Mission Planner, se establece un ascenso de 15 metros para llegar a la zona de pulverización donde le dron pasara todos los obstáculos que se presenten en el trayecto hasta llegar a 5 metros de altitud.
- Este documento utiliza el modelado de SolidWorks para el diseño visual de la estructura del UAV, respalda la importancia del estudio de SolidWorks y tiene como objetivo demostrar la facilidad de uso de este programa y, finalmente, las muchas posibilidades para desarrollar análisis de elementos finitos, siendo trabajado por personas sin experiencia. El material de

estudio en SolidWorks elegido fue aluminio aeroespacial, ligero, resistente a la corrosión.

- La simulación en el programa XCalc Copter ayudó a demostrar la factibilidad del diseño del UAV y ayudó a contrastar los datos calculados de forma teórica para conseguir el factor de diseño equilibrado que facilito la validación del desempeño.
- Aún queda el siguiente paso que es la fabricación de un prototipo que implemente las especificaciones iteradas para mayor seguridad y optimización a la hora de ponerlo en marcha en un cultivo de papa real en Boyacá-Colombia.
- Para futuras investigaciones se recomienda, optimizar sensores que permitan la detección del terreno y lograr una estabilidad de elevación en terrenos irregulares y tener una pulverización más eficiente.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Bibliografía

- A. Lausch and D. Doktor, L. S. (1 de enero de 2013). *Análisis de patrones de vegetación y suelo utilizando sensores remotos hiperspectrales, EMI y mediciones de rayos gamma*. Obtenido de Dep. of Computational Landscape Ecology, UFZ Helmholtz Centre for Environmental Research, Permoserstr.: doi:10.2136/vzj2012.0217
- AeroSmart. (2021). Obtenido de Fly Dragon FDXD-8R-22L Agricultural Drone: <https://www.aerosmart.ae/product/fly-dragon-fdxd-8r-22l-agricultural-drone/>
- Agrawal, K., & Shrivastav, P. (noviembre de 2015). *International Journal of Science and Research (IJSR)*. Obtenido de Multi-Rotors: A Revolution In Unmanned Aerial Vehicle: https://www.ijsr.net/get_abstract.php?paper_id=NOV151540
- Agro Cabildo. (enero de 2017). *POLILLA GUATEMALTECA DE LA PAPA (Tecia solanivora) IDENTIFICACIÓN Y CONTROL*. Obtenido de Cabildo de Tenerife: http://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/papa_215_polilla.pdf
- Aguirre, E. S. (25 de Enero de 2019). *Un Profesor*. Obtenido de Metamorfosis de los insectos - Resumen: <https://www.unprofesor.com/ciencias-naturales/metamorfosis-de-los-insectos-resumen-3083.html>
- Albert Rangoa, A. L. (13 de agosto de 2009). *Detección remota basada en vehículos aéreos no tripulados para evaluación, monitoreo y manejo de pastizales*. Obtenido de USDA-ARS, bNew Mexico State University: doi:10.1117/1.3216822
- American Psychological Association. (2010). *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association* (6 ed.). (M. G. Frías, Trad.) México, México: El Manual Moderno.
- Andrés Valencia Pinzón (Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural) . (2019). *Política Agropecuaria y de Desarrollo Rural 2018 - 2022*. Obtenido de MinAgricultura: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Documentos/5.%20LINEAMIENTOS%20DE%20LA%20POL%20C3%8DTICA%20DE%20INSUMOS%20AGROPECURIOS.pdf>
- Bayona, R. E. (2013). Manejo integrado de plagas y enfermedades en el cultivo de papa. CUSCO, paucartambo, Perú.
- Bejarano, J. (2012). *Guía para la gestión ambiental responsable de los plaguicidas químicos de uso agrícola en Colombia*. Obtenido de https://digital-library-drupal.s3.sa-east-1.amazonaws.com/library-content/link_8._gu%C3%ADa_ambiental_manejo_agroqu%C3%ADmicos.pdf
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). *PROGRAMA DE APOYO AGRÍCOLA Y AGROINDUSTRIAL VICEPRESIDENCIA DE FORTALECIMIENTO EMPRESARIAL CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ*. Obtenido de <https://www.ccb.org.co/content/download/13727/175111/file/Papa.pdf>
- Cesar Ñustes, J. P. (2019). SEGUNDA ENTREGA PROYECTO. Neiva.
- Chapa, L. (2014). *Drone journalism begins slow take off*. Obtenido de Reporters Committee for Freedom of the Press: <https://www.rcfp.org/journals/drone-journalism-begins-slo/>
- Costa, F. G., Ueyama, J., Braun, T., Pessin, G., Osório, F. S., & Vargas, P. A. (2012). The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor network in agricultural applications. Munich: IEEE.
- Cuerno Rejado Cristina, G. H. (2016). Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad. *Dyna*, 282-288. Obtenido de <https://doi.org/10.6036/7781>

- Cuervo, R. e. (2019). *Gruia de plagas*. Obtenido de Rancho el cuervo: <https://www.ranchoelcuervo.com/papa-2/#acc-x6zn352-0>
- Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. (SEPTIEMBRE de 2020). *MINAGRICULTURA*. Obtenido de MINAGRICULTURA: <https://www.minagricultura.gov.co/paginas/default.aspx>
- DJI. (Noviembre de 2021). *DJI*. Obtenido de DJI.
- F. Montesdeoca, C. (abril de 2013). Obtenido de Guía fotográfica de las principales plagas del cultivo de papa en Ecuador: <http://cipotato.org/wp-content/uploads/2013/04/0060841-1.pdf>
- Fedepapa. (2010). *FEDEPAPA y Gobernación de Cundinamarca*. Obtenido de Plagas y enfermedades de la papa: <http://jovenesrurales.minagricultura.gov.co/documents/10180/160303/Plagas+y+enfermedades+de+la+papa-Investigaci%C3%B3n/0a3abf4d-a4db-4be2-ae50-d86db3c8d2ec>
- Giles D.K., B. R. (2015). Deployment and performance of a UAV for crop spraying. *chemical engineering transactions. california: chemical engineering transactions*.
- Gómez G, R. E. (2011). Factores de riesgos ocupacionales a los cuales se encuentran expuestos los trabajadores informales de la agricultura en el municipio de Potosí, Nariño para el año 2010. Nariño .
- Gómez G, R. E. (12 de Septiembre de 2016). Factores de riesgos ocupacionales a los cuales se encuentran expuestos los trabajadores informales de la agricultura en el municipio de Potosí. Nariño, Cundinamarca, Colombia.
- HeldForrans. (2015). *HeldForrans*. Obtenido de Cómo Lidar Con El Tizón Tardío En Las Papas: <https://us.heldforranson.com/915-how-to-deal-with-late-blight-on-potatoes.html>
- ICA y Colaboradores. (2011). *Manejo fitosanitario del cultivo de papa*. Obtenido de ICA: <https://www.ica.gov.co/getattachment/b2645c33-d4b4-4d9d-84ac-197c55e7d3d0/Manejo-fitosanitario-del-cultivo-de-la-papa-nbsp;-.aspx>
- ICA, I. C. (23 de Mayo de 2016). *Informe especial: Polilla Guatemalteca o Polilla de la Papa*. Obtenido de ICA (Instituto Colombiano Agropecuario): <https://www.ica.gov.co/noticias/todas/2016/informe-especial-polilla-guatemalteca-o-polilla-de>
- Inostroza, J., Méndez, P., & Ríos, P. (Octubre de 2011). *INIA*. Obtenido de Manual de campo uso de equipos pulverizadores: <http://static.elmercurio.cl/Documentos/Campo/2013/02/07/20130207174510.pdf>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2011). *Instituto Colombiano Agropecuario*. Obtenido de Manejo fitosanitario del cultivo de la papa (medidas para la temporada invernal): <https://www.ica.gov.co/getattachment/b2645c33-d4b4-4d9d-84ac-197c55e7d3d0/Manejo-fitosanitario-del-cultivo-de-la-papa-nbsp;-.aspx>
- Instituto colombiano Agropecuario ICA. (23 de mayo de 2016). *Informe especial: Polilla Guatemalteca o Polilla de la Papa*. Obtenido de ICA: <https://www.ica.gov.co/noticias/todas/2016/informe-especial-polilla-guatemalteca-o-polilla-de>
- J., B. (2016). Guía para la gestión ambiental responsable de los plaguicidas químicos de uso agrícola en Colombia.
- Jeremie, L., Savvaris, Tsourdos, D. A., & Antonios., P. (31 de mayo de 2013). *Gestión energética en enjambre de vehículos aéreos no tripulados*. Obtenido de International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS): doi:10.1109/icuas.2013.6564681

- Klaus & Lita. (s.f.). Obtenido de <https://klsin.bpmsg.com/how-fast-can-a-quadcopter-fly/m>
Lifecrop. (2013). *Crop Life*. Obtenido de CropLife Latin America:
<https://www.croplifela.org/es/plagas/listado-de-plagas/gorgojo-de-los-andes>
- McAdams, D. D. (6 de mayo de 2015). *Radio World*. Obtenido de
<https://www.radioworld.com/news-and-business/cea-1-million-us-drone-flights-daily-by-2025>
- Mery Esperanza Fernández, FONADE E IDEAM. (2013 de MARZO de 2013). EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCION Y RENDIMIENTO DE CULTIVOS POR SECTORES EVALUACION DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO POR SECTORES. COLOMBIA.
- Natu A.S., K. S. (2016). Adoption and utilization of drones for advanced precision farming: A review. Maharashtra: International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication.
- OscarLiang. (27 de Abril de 2021). *OscarLiang.com*. Obtenido de Types of Multirotor:
<http://blog.oscarliang.net/types-of-multicopter/>
- Page Baluch. (31 de mayo de 2017). *Metamorfosis Completa*. Obtenido de Arizona State University School of Life Sciences Ask A Biologist:
<https://askbiologist.asu.edu/metamorfosis-completa>
- Pinzón, A. V. (2019). *Política Agropecuaria y de Desarrollo Rural 2018 - 2022*. Obtenido de Insumos Agropecuarios: <https://www.minagricultura.gov.co/paginas/default.aspx>
- Potencia & Energia. (24 de septiembre de 2021). *ENERMAX*. Obtenido de Fumigadora Estacionaria 160-ES30: <https://energiaypotencia.com/cotizador/producto/160-es30>
- precision farming iberia. (Noviembre de 2021). Obtenido de Dron M6-G200:
<https://precisionfarmingiberia.com/dron-m6e-g200/>
- PriceWaterhouseCoopers. (Mayo de 2016). *Clarity from above: PwC global report on the commercial applications of drone technology*. Obtenido de PwC:
<https://www.pwc.pl/pl/pdf/clarity-from-above-pwc.pdf>
- Prof. B.Balaji, S. K. (2018). Design of UAV (Drone) for Crops, Weather Monitoring and For Spraying Fertilizers and Pesticides. India: IJRTI.
- Raffaele Vignola, W. W. (Enero de 2017). *PRÁCTICAS EFECTIVAS PARA LA REDUCCIÓN DE IMPACTOS POR EVENTOS CLIMÁTICOS EN EL CULTIVO DE PAPA EN COSTA RICA*. Obtenido de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/reduccion-impacto-por-eventos-climaticos/Informe-final-papa.pdf>
- Rahul Desale, A. C. (2019). Unmanned Aerial Vehicle for Pesticides Spraying. Navi Mumbai: IJSART.
- Revista de investigaciones Agropecuarias. (2017). *RIA*. Obtenido de Revista de investigaciones Agropecuarias: <http://ria.inta.gob.ar/contenido/papa-descifran-el-genoma-del-virus-del-enrollamientodelahoja#:~:text=El%20virus%20del%20enrollamiento%20de,de%20la%20p>
- Serrano Cordero Cristian, P. C. (2016). *Análisis, diseño estructural y construcción de*.
- SIMMONDS, I. F. (22 de mayo de 2019). *AGRONEGOCIOS*. (LA REPÚBLICA S.A.S.) Recuperado el 13 de noviembre de 2020, de <https://www.agronegocios.co/aprenda/los-cuidados-que-debe-tener-en-lo-cultivos-de-papa-por-el-rhizoctonia-2864643>
- Sohail S., N. S. (2017). Modeling, controlling and stability of UAV quad copter. IEEE.
- Spoorthi S., S. B. (2017). Freyr drone: pesticide/fertilizers spraying drone-an agricultural approach. Chennai, India: IEEE.

- Spoorthi, S., Shadaksharappa, B., Suraj, S., & Manasa, V. (2017). Freyr drone: Pesticide/fertilizers spraying. Tamil Nadu, India,: 2nd International Conference on Computing.
- Stanley R. Herwitz, L. F. (mayo de 2002). *Agricultura de precisión como aplicación comercial para vehículos aéreos no tripulados con energía solar*. Obtenido de Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/229091535_Precision_Agriculture_as_a_Commercial_Application_for_Solar-Powered_Unmanned_Aerial_Vehicles
- Tech Unmanned. (15 de noviembre de 2012). *Unmanned Tech*. Obtenido de Q800 HEXACOPTER assamble guide: <https://www.unmannedtech.co.uk/manuals/q800-hexacopter-frame-assembly-guide>
- T-Motor. (6 de noviembre de 2021). *store.tmotor*. Obtenido de T-Motor U15 II KV80: <https://store.tmotor.com/goods.php?id=732>
- Tremayne, M., & Clark, A. (14 de junio de 2014). *New Perspectives from The Sky: Unmanned Aerial Vehicles and Journalism*. Obtenido de Taylor & Francis Online Group : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21670811.2013.805039>
- United States. Joint Chiefs of Staff. (15 de junio de 2015). *Joint Publication 1-02: Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms*. Obtenido de Homeland Security Digital Library: <https://www.hsdl.org/?abstract&did=750658>
- V.P., B. (1999). UAVS: an overview. Air & Space Europe.
- XAG. (Noviembre de 2021). *XAG*. Obtenido de XAG P30: <https://www.xa.com/en/p30>
- Xinyu Xue, Y. L. (2016). Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system. Guangzhou: el sevier.
- Yallappa D., V. M. (2017). Development and evaluation of drone mountedsprayer for pesticide applications to crops. Karnataka: IEEE .
- Yanbo Huang, S. J. (2010). *Teledetección térmica y multispectral aerotransportada para detectar la aparición de estrés en los cultivos causado por múltiples factores*. Obtenido de aUnited States Department of Agriculture (USDA), Agricultural Research Service (ARS), Crop Production Systems Research Unit (CPSRU),: <https://doi.org/10.1117/12.864190>
- Zhang C, K. J. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. Canada: Springer Link.

