
DESARROLLO DE UNA AERONAVE NO
TRIPULADA CON DETECTOR DE METALES PARA
LA BÚSQUEDA DE MINAS ANTIPERSONALES

Presentado por
John Alberto Gómez Useda
Jessica Bautista Pedreros



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas
Programa de Ingeniería Aeronáutica
Bogotá D.C, Colombia
2019

DESARROLLO DE UNA AERONAVE NO
TRIPULADA CON DETECTOR DE METALES PARA
LA BÚSQUEDA DE MINAS ANTIPERSONALES.



Presentado por

John Alberto Gómez Useda

Jessica Bautista Pedrero

LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

en cumplimiento parcial de los requerimientos para optar
por el

título de

Ingeniero Aeronáutico

Dirigida por

DIDIER ALDANA RODRIGUEZ

Presentada a

Programa de Ingeniería Aeronáutica Fundación
Universitaria Los Libertadores Bogotá D.C,
Colombia.

2019

Notas de aceptación



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá DC, Julio de 2019.



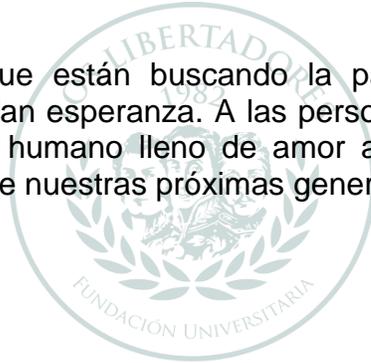
LOS LIBERTADORES

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 todas las personas que están buscando la paz en cualquier acto de solidaridad, apoyo y brindan esperanza. A las personas que desean construir un futuro con cada acto humano lleno de amor apoyando a nuestro país, logrando un crecimiento de nuestras próximas generaciones.



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer a nuestra familia, que sin desfallecer creyeron en nosotros insistentemente para poder culminar, este ciclo de nuestras vidas profesionales y poder continuar con nuestros sueños y retos.

A mi hermosa Laura que, gracias a su apoyo, comprensión y sobre todo su gran sabiduría pudo guiarme en el camino correcto para poder culminar este logro.

A nuestro tutor que permitió abrir nuestras mentes, buscando la solución a cada problema evidenciado durante el desarrollo de esta tesis, logrando sacar a flote nuestras capacidades investigativas e ingenio para cumplir con los objetivos propuestos.

A todas las personas que nos apoyaron y siempre estuvieron allí con palabras de aliento y sobre todo esperanza y ánimo para continuar con nuestro objetivo.

ÍNDICE GENERAL

1. CAPITULO: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. OBJETIVO GENERAL	10
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	11
2. CAPITULO MARCO TEÓRICO.....	12
2.1. SISTEMAS DE BÚSQUEDA DE MINAS ANTIPERSONALES	12
2.2. SISTEMAS DE NEUTRALIZACIÓN DE MAP	14
2.3. AERONAVES NO TRIPULADAS.....	15
2.3.1. Historia de las aeronaves no tripuladas y avances en el campo de desminado.....	16
2.3.2. Configuraciones de un dron e	18
2.3.3. Clasificación	20
2.3.4. Aplicaciones	22
2.3.5. Componentes de un Dron e	23
2.3.6. Especificaciones técnicas	27
2.4. FUNDAMENTOS TEORICOS	29
2.4.1. Potencia según la Teoría de la Cantidad de Momento.....	29
2.4.2. Teoría del Elemento de la Pala en una Hélice	31
2.4.3. Fundamento Estructural	34
2.5. MARCO LEGAL.....	38
3. CAPITULO: METODOLOGIA APLICADA	40
3.1. DISEÑO PRELIMINAR	40
3.1.1. Misión.....	40
3.1.2. Requisitos	42
3.1.3. Selección de la configuración del Dron e	43
3.1.4. Componentes para el diseño.	44
3.2. ESTUDIO AERODINÁMICO Y MECÁNICO	45
3.2.1. Cálculo de la potencia de acuerdo a la TCM.....	45
3.2.2. Análisis teoría de pala	57
3.2.4. Calculo de autonomía del hexacoptero	64
3.2.5. Análisis estructural	66

3.3.	SELECCIÓN DE COMPONENTES	72
3.3.1.	Componentes seleccionados de acuerdo a sus características técnicas	73
3.4.	DISEÑO DEL PROTOTIPO	74
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	76
4.1.	ANÁLISIS CENTRO DE GRAVEDAD.....	76
4.2.	SOFTWARE PARA LA SIMULACION	79
4.2.1.	ACTUALES SISTEMAS	79
4.3.	SIMULACIÓN	81
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
6.	BIBLIOGRAFIA	90
7.	ANEXOS	92

Índice de Tablas

Tabla 1 Datos de víctimas 2014.....	5
Tabla 2. Costo de víctimas antipersonales	8
Tabla 3. Comparación de costos para Desminado en Colombia	9
Tabla 4 Métodos para la detección de minas.	12
Tabla 5. Sistema de neutralización de minas	14
Tabla 6. Propuestas de Categorización por Brooke - Holland basada en el peso	20
Tabla 7. Propuesta de Categorización por Arjomandi et al basado en el peso	21
Tabla 8. Propuesta de Categorización de Drones por Weibel y Hasman basada en el peso.....	21
Tabla 9. Propuesta de Categorización de Drones por Zakora y Molodchik basado en el peso y rango de vuelo	21
Tabla 10 Especificaciones de Drones Comerciales.	28
Tabla 11 Marco legal.	39
Tabla 12 Requisitos para la misión	42
Tabla 13 validación de la configuración del dron.	43
Tabla 14 Componentes.....	44
Tabla 15 Densidad de ciudades con mayor número de víctimas	47
Tabla 16 Potencia inducida en vuelo a punto fijo.....	49
Tabla 17 Velocidad Ascendente en TMC.....	51
Tabla 18 Potencia en vuelo axial descendente.....	54
Tabla 19 Potencia Vuelo de avance	57
Tabla 20 Pesos de los componentes de la aeronave	76
Tabla 21 Distancias referente a Datum.....	77
Tabla 22 Momento de cada componente.....	78
Tabla 23 Centro de Gravedad.....	79

Índice de Figuras

Figura 1. Estadística Víctimas de minas antipersonales en Civiles y Fuerza Pública.....	6
Figura 2. Situación Nacional de Víctimas Antipersonal en Colombia (2019)	7
Figura 3. Resultados de la Liberación de tierras en Colombia.....	15
Figura 4 Drone mine kafon con sus tres etapas.....	17
Figura 5 Configuraciones con 4 motores	19
Figura 6 configuraciones con seis motores.....	19
Figura 7 Configuración de 8 motores.....	20
Figura 8. Espectro de Drones desde UAV hasta el SD.....	22
Figura 9. Clasificación de drones según su aplicación	23
Figura 10 Chasis de un drone.....	23
Figura 11 Fibra de Carbono.....	24
Figura 12 Fibra de vidrio	24
Figura 13 Chasis de DRONE en plástico Biodegradable.....	24
Figura 14 Motor Drone de Carreras	24
Figura 15 DRONE Juguete	25
Figura 16 DRONE Profesionales	25
Figura 17 Hélice de drone.....	25
Figura 18 Controladora de vuelo Pixhawk	26
Figura 19 Sensor de ultrasonido.....	26
Figura 20 Batería de Litio-Polímero	27
Figura 21 Disco de accionamiento para el rotor de vuelo estacionario.....	29
Figura 22 Coordenadas de la pala.....	32
Figura 23 Condiciones de la sección de la cuchilla en vuelo vertical.....	33
Figura 24 Propiedad mecánica de los materiales	35
Figura 25 Deformación en extremo de la viga.	36
Figura 26 Grafica de esfuerzos sobre viga	37
Figura 27 Diagrama de Esfuerzo Máximo en viga	38
Figura 28 Zona establecidas para la misión-	40
Figura 29 Priorización de Victimas.....	41
Figura 30 Ubicación zonas priorizadas.	41
Figura 31 Volumen de control del fluido.....	46
Figura 32 Potencia requerida en función de la velocidad de descenso	53
Figura 33 Potencia ideal vs Velocidad de Traslación.....	55
Figura 34 Potencia ideal en función de la velocidad inducida caso 1.	56
Figura 35 Potencia requerida vs velocidad inducida caso 2	56
Figura 36 Brazo del drone	66
Figura 37 Fuerza aplicada en el brazo.....	67
Figura 38 Diagrama del momento flector	68

Figura 39 Distribución de tensiones.....	69
Figura 40 Diseño 3D del drone DJI S900	74
Figura 41 Roscado del Detector de metales	75
Figura 42 vista 3D del Hexacopter con el Detector de metales	75
Figura 43 Distancias de los componentes vs Datum	77
Figura 44 Estación de tierra DJI.....	80
Figura 45 Arquitectura software simulación	81
Figura 46 Programa Cywing	82
Figura 47 Mavlink configurada con Cywing	83
Figura 48 Conexión con MAVProxy	83
Figura 49 Punto de Poligono Mission Planner	84
Figura 50 Selección del enmallado	84
Figura 51 Establecimiento del enmallado con la velocidad.....	85
Figura 52 establecimiento del plan de vuelo.....	85
Figura 53 configuración para la misión	86
Figura 54 Finalización de misión búsqueda de minas	86
Figura 55 Código fuente para la búsqueda de minas.	87
Figura 56 misión para la destrucción de las minas.	88

Abreviaturas

AEI	Artefactos explosivos improvisados
AICMA	Acción integral contra minas antipersona
AIV	Asistencia integral a víctimas
CG	Centro de gravedad
CONPES	Política nacional de acción contra minas antipersonal
DAICMA	Dirección para la acción integral contra minas antipersonal
DH	Desminado humanitario
DNP	Departamento nacional de planeación
ESC	Controlador de velocidad electrónico
GPS	Sistema de posicionamiento global
ICBL	Miembro de la campaña internacional contra las minas
IMS	Information management system
ISA	Atmósfera estándar internacional
MAP	Minas antipersonales
MUSE	Municiones sin explosionar
NAV	Nano vehículo aéreo
PANS	Procedimiento para los servicios de la navegación aérea
PAV	Pico vehículo aéreo
PLA	Plástico biodegradable derivado de recursos renovables
RPV	Vehículo aéreo pilotado remotamente
TCM	Teoría de cantidad de movimiento
TEP	Teoría de elemento de la hélice
UAS	Unmanned aircraft systems
UAV	Vehículo volador no tripulado

DESARROLLO DE UNA AERONAVE NO TRIPULADA CON DETECTOR DE METALES PARA LA BÚSQUEDA DE MINAS ANTIPERSONALES.

Resumen

En el mundo existen aproximadamente 110 millones de minas antipersonales no explotadas que se encuentran distribuidas en 64 países. Estas se activan solo por contacto o proximidad a ellas y pueden estar activas hasta después de 50 años de plantada. Lo anterior representa un potencial riesgo para las personas que viven cerca al conflicto armado, ya que si por error activan una mina pueden tener serias lesiones tales como amputaciones, mutilaciones genitales, lesiones musculares y en órganos internos, quemaduras entre otros muchos efectos.

Por lo anterior, este documento propone, por medio de la tecnología y los nuevos dispositivos, diseñar un modelo de prototipo de detector de minas al integrar una aeronave no tripulada con un detector de metales. El diseño de dicha aeronave no tripulada debe cumplir con requisitos específicos para poder sobrevolar campos minados y lograr de una manera eficiente la detección de estos artefactos explosivos sin que se afecte la integridad de las personas que realizan las labores de desminado en las diferentes zonas del país. Dicho dispositivo busca disminuir las tasas de accidentalidad en el ejercicio de desminar un territorio, así como contribuir en la erradicación de minas existentes, mejorando la eficiencia y tiempos de búsqueda.

Palabras claves: Aeronave no tripulada, minas antipersonales, técnicas de detección, mapeo, aerodinámica, teoría de movimiento continuo.

INTRODUCCIÓN

En Colombia el conflicto armado ha permanecido latente por más de 50 años y ha azotado a las regiones del país a lo largo de su historia, causando diferentes efectos como innumerables pérdidas humanas y lesiones irreparables en el tejido social. Una estrategia en esta guerra es la utilización de minas antipersonales ya que su efectividad se ve reflejada en la disminución de los números de las tropas de manera rápida y con un bajo costo. Sin embargo, este método conlleva importantes afectaciones a la población civil que se encuentra en medio del fuego cruzado. Para los gobiernos resulta un problema pues es causal de numerables víctimas, a lo que se suma su difícil detección y costos de erradicación. Todo esto genera inseguridad en la población que habita dichos territorios, desarrollando comportamientos contractivos, como no cultivar sus tierras, evadir ciertas zonas, deserción escolar, entre otras que afectan el desarrollo económico de las regiones.

A su vez, las minas antipersonales no generan el 100% de muertes cuando explotan, éstas pueden causar daños irreversibles a la víctima. Sin embargo, el objetivo de dicho armamento es causar algún tipo de daño a la persona que la activa y con ellos inhabilitarlo en el combate. Para profundizar un poco se pueden encontrar diferentes dispositivos como Mina Antipersonal (MAP), Municiones sin Explosionar (MUSE) y Artefactos Explosivos Improvisados (AEI), municiones de racimo como lo son el tipo cilindro, tipo cajón, la mina quiebrapatras, mina costal, entre otros. Estos artefactos explosivos se encuentran en la mayoría de los casos sembradas por grupos subversivos al margen de la ley en territorios donde el conflicto armado tenía mayor presencia. En la actualidad el Gobierno colombiano tiene identificadas algunas de estas zonas, aunque, no puede garantizar el total conocimiento de las zonas existentes con minas en el territorio nacional ni el 100% de la erradicación de las mismas.¹

Actualmente se cuenta con diferentes métodos de búsqueda de minas y destrucción de las mismas, con el fin de salvar vidas y poder erradicar estos artefactos. Por ejemplo, es común la utilización de animales como perros, ratas APOPO de África, la rata albina, e inclusive el uso de insectos como abejas y hormigas.² También formas mecánicas como detectores de metales, radares de penetración terrestre, sensores electromagnéticos, acústicosísmico, cámaras infrarrojas, retrodispersión de rayos X, entre otros.

Así mismo, para la destrucción de estos artefactos, una vez se logra verificar su ubicación, aplicando métodos como la remoción de forma manual, la explosión controlada de mediante el uso de explosivos, o maquinaria que pisa los campos

¹ GONZÁLEZ, B. Colombia y las Minas Antipersonal-Sembrando Minas Cosechando Muerte. Bogotá: Crear & Comunicar, 2000.

² PAZ PENAGOS, Hernán. Minas antipersonal en Colombia. 2011.

minados para efectuar la destrucción de las minas.

Uno de los problemas que se ha presentado en la búsqueda de minas antipersonales es el factor humano, ya que, dada su vulnerabilidad, aun utilizando los elementos de protección personal requeridos para efectuar este tipo de procedimientos, puede resultar herido. De acuerdo a lo anterior, este proyecto nace para dar una posible solución integrando la tecnología de una aeronave no tripulada que cuente con un detector de metales y que puede ser direccionada de manera remota para el ascenso y descenso vertical, sin poner en riesgo la vida de las personas, disminuyendo el riesgo de sufrir un daño colateral al realizar la labor de búsqueda de minas antipersonales, mejorando la eficacia en dicha labor.

Como primera medida, este documento explica en su marco referencial, cómo funcionan las aeronaves no tripuladas y los detectores de metales, una breve historia de la implementación de estas tecnologías y como han evolucionado de acuerdo a las necesidades presentadas en los tiempos actuales. También se describe la normatividad que soporta la actividad de desminado en Colombia.

Para el diseño de la nave no tripulada se realizó un análisis de los requerimientos esenciales que demanda este tipo de artefactos, con lo cual se determinó la mejor configuración para el uso en cualquier terreno de búsqueda y respectiva destrucción de los artefactos explosivos, logrando un producto único que permita maximizar el esfuerzo de la búsqueda de minas antipersonales y permita minimizar los tiempos, así como mitigar el riesgo del personal que se expone a dicha labor.

Como parte de la metodología se realizó la simulación dentro de los parámetros establecidos, con el fin de evidenciar como el drone realiza la misión deseada (detección de minas) de acuerdo al terreno presentado, luego se expone un programa que permite analizar los datos arrojados por el drone y luego realizar una nueva misión la cual irá a los sitios donde se detectó las minas para desactivarlas por medio de artefactos explosivos controlados y con ello detonarlos de forma segura.

Finalmente se concluyó con los cálculos y la simulación, que es posible integrar las dos tecnologías; demostrando que el drone es capaz de soportar el peso del detector de metales sin afectar sus condiciones de vuelo, comprobando que es posible utilizar esta tecnología en los campos minados del país.

1. CAPITULO: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, aproximadamente 64 países en el mundo han alojado en su territorio entre 65 y 110 millones de minas antipersonales y cada año son sembradas casi dos millones de minas más, mientras otras 100 millones se encuentran almacenadas para su posterior uso.³

Para erradicar las minas antipersonales de estos países, se calcula que son necesarios aproximadamente entre 500 y 850 años, esto es debido a la tasa de desactivación, la cual al ser comparada con la tasa a la que se siembran las minas antipersonales, resulta menor, generando un problema que aumenta con el tiempo.

Las minas antipersonales a diferencia de otras armas están diseñadas exclusivamente para ser activadas cuando se aproxima una víctima, la cual puede activarla por ella misma o ser activada remotamente. Uno de los mayores problemas, es que puede continuar con sus efectos devastadores durante mucho tiempo si no son encontradas y destruidas por un grupo de expertos especializados en el campo, convirtiéndola en un arma perdurable en el tiempo

El objetivo de este tipo de artefacto es la muerte de la persona o la inmovilización de la avanzada enemiga y son utilizadas tanto en el ejército regular para la protección de infraestructuras, bases militares o con fines de entrenamiento, como en el ejército insurgente (organizado por una guerrilla), las cuales se utilizan generalmente para afectar la infraestructura económica, disminuir la capacidad militar. Por lo general son ubicadas en pozos, cultivos, vías de comunicación, cercano a colegios y carreteras e incluso poblaciones.

Reconocida la gravedad de este problema en 1997, 90 países incluyendo Colombia, se reunieron voluntariamente para llegar a un acuerdo en conjunto, el cual se conoce como tratado de Ottawa, donde se estableció un acuerdo internacional para la prohibición total del desarrollo, producción, almacenamiento, transferencia y empleo de minas antipersonal, en el que se exige su destrucción en todo el territorio nacional.⁴

De acuerdo a la ficha técnica elaborada por la ONG International Campaign to Ban Landmines (ICBL) en 2013 en el mundo se registraron 2.403 víctimas civiles en 39 estados, de las cuales 1.112 víctimas son menores de edad (un 46%

³ LAHUERTA, Yilberto; ALTAMAR, Ivette María. La erradicación de las minas antipersonal sembradas en Colombia, Implicaciones y costos. Dirección de Justicia y Seguridad del DNP, Archivos de Economía, 2002, vol. 178.

⁴ Ibid. p.10

aproximadamente), registrando un aumento del 39% de acuerdo al reporte del 2012, siendo el segundo porcentaje más alto de menores víctimas después del 49% registrado en el 2007⁵.

Como se evidencia en la Tabla 1 que Colombia es conocida como el segundo país con más víctimas por minas antipersonales en el mundo. De acuerdo al informe presentado por la ONG International Campaign to Ban Landmines (ICBL) en 2014, donde se presentaron 165 Víctimas Civiles por minas antipersonales y remanentes de explosivos antipersonales en los cuales, 57 son menores de edad. ⁶

Tabla 1 Datos de víctimas 2014

Estado	Menores de Edad Víctimas	Total de Víctimas Civiles	Menores de Edad Víctimas entre las Víctimas Civiles
Afganistán	487	1.024	48%
Colombia	57	165	35%
Siria	50	133	38%
Pakistán	45	175	26%
Yemen	40	49	82%
Sudan del Sur	33	46	72%
Somalia	29	65	45%

Fuente: INTERNATIONAL CAMPAIGN TO BAN LANDMINES, Noviembre del 2014

De igual manera, de acuerdo a la Dirección para la Acción Integral contra Minas Antipersonal (DAICMA) del Ministerio de Posconflicto, derechos humanos y seguridad, en Colombia se ha presentado desde 1990 al 31 de marzo del 2019 un total de 11.735 víctimas por minas anti personales (MAP) y munición sin explotar (MUSE), donde se presentaron un total de 42 víctimas desde el 01 de enero al 31 de marzo del 2019, de los cuales 25 eran miembros de las Fuerza Pública y 17 Civiles⁷.

Consiguiente a estos datos se ha trabajado con muchos organismos para el despeje de estas zonas afectadas como nos muestra el DAICMA, durante el 2019 4

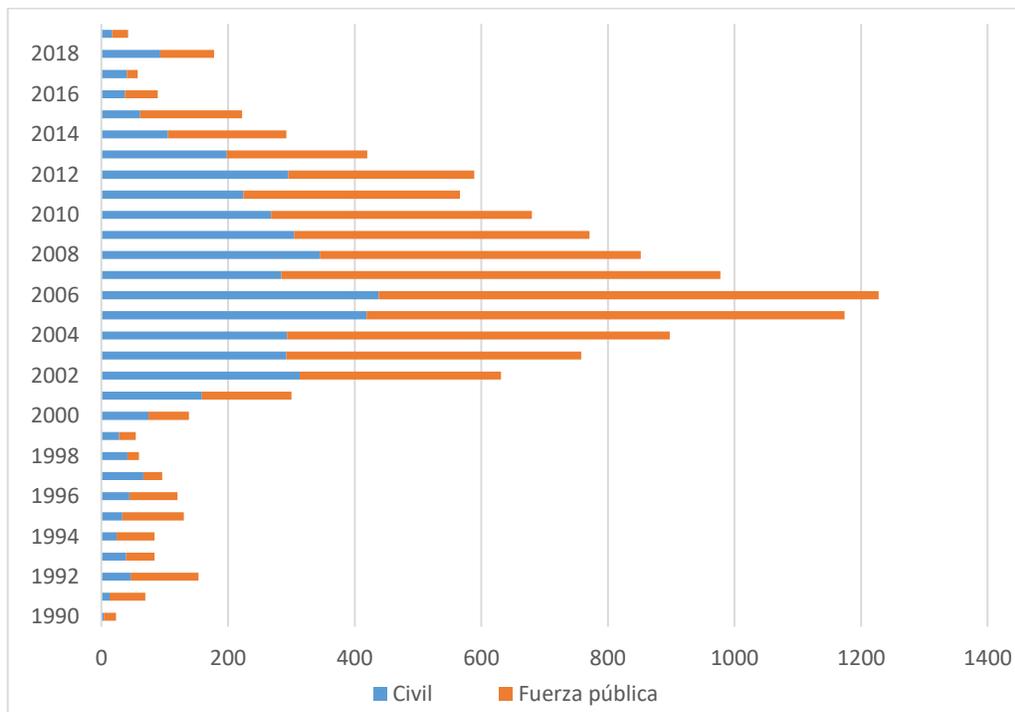
⁵ INTERNATIONAL CAMPAIGN TO BAN LANDMINES. Ficha técnica: El impacto de las minas antipersonales y los remanentes explosivos de guerra sobre los menores de edad. Noviembre del 2014. Enlace: <http://colombiasinminas.org/wp-content/uploads/2014/12/249774308-Ficha-Tecnica-El-Impacto-de-Las-Minas-Antipersonal-y-Los-Remanentes-Explosivos-de-Guerra-Sobre-Los-Menores-de-Edad.pdf>

⁶ Ibid. p. 2.

⁷ DIRECCIÓN PARA LA ACCIÓN INTEGRAL CONTRA MINAS ANTIPERSONALES. [En línea] 30 de marzo de 2019, [revisado en 24 de abril de 2019] disponible en internet: <http://www.accioncontraminas.gov.co/estadisticas/Paginas/victimas-minas-antipersonal.aspx>

departamento, se encuentran sin sospecha de minas, al igual que 346 municipios que se encuentran actualmente liberados de sospechas de minas antipersonales y 166 municipios que se encuentran en intervención por organizaciones nacionales y civiles para la búsqueda y desactivación de artefactos explosivos improvisados y munición sin explotar.⁸

Figura 1. Estadística Víctimas de minas antipersonales en Civiles y Fuerza Pública.



Fuente: DIRECCIÓN PARA LA ACCIÓN INTEGRAL CONTRA MINAS ANTIPERSONALES. 30 de marzo de 2019, [revisado en 24 de abril de 2019] Disponible en internet <http://www.accioncontraminas.gov.co/accion/desminado/Documents/170713-Anexo1-Victimas.zip>

Como se evidencia en la Figura 1, el mayor porcentaje de víctimas en Colombia se han presentado en la Fuerza Pública con un 60,8% el cual corresponde a 7.138 miembros y 4.597 víctimas de la población civil las cuales corresponden al 39,1%.

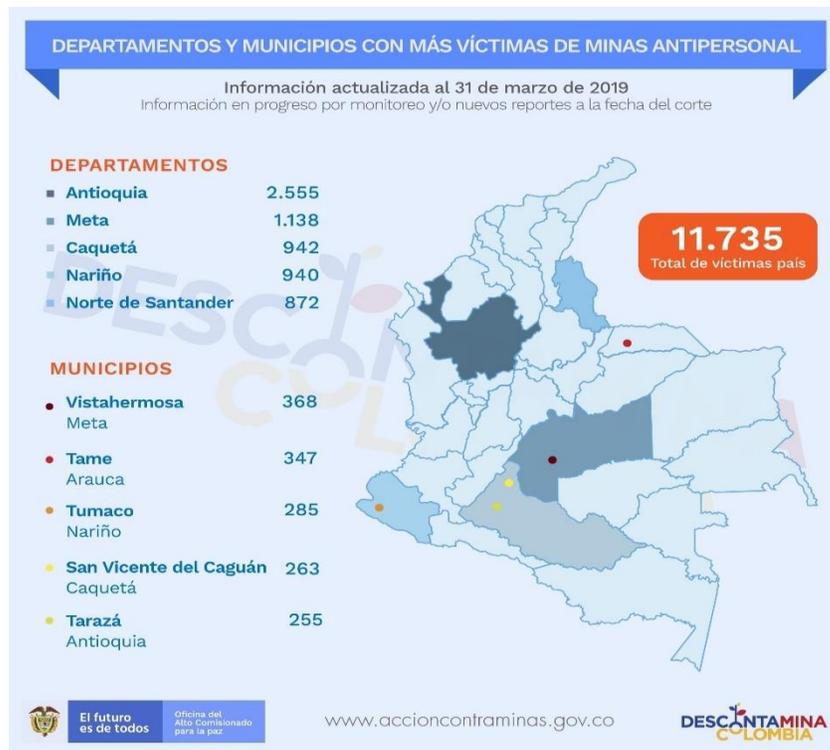
Las víctimas pueden perder la vida o alguna extremidad, o cualquier otra afectación a causas de la onda explosiva. Para el caso de las víctimas civiles se pone en riesgo uno de los derechos fundamentales de acuerdo a la Constitución Política de Colombia en su artículo 11, donde se manifiesta el derecho a la vida. De acuerdo al

⁸ DIRECCIÓN PARA LA ACCIÓN INTEGRAL CONTRA MINAS ANTIPERSONALES. [En línea] 30 de marzo de 2019, [revisado en 24 de abril de 2019] disponible en internet: <http://www.accioncontraminas.gov.co/estadisticas/Paginas/victimas-minas-antipersonal.aspx>

reporte de la Dirección Nacional de Minas antipersonales, de las 11.585 víctimas desde 1990 a 31 de marzo 2019, el 80,4% (9.442) resultaron heridas y el 19,6% (2.293) murieron en el lugar del accidente⁹.

De igual manera, al observar la situación actual de víctimas por minas antipersonales y municiones sin explotar, se evidencia un aumento como se observa a continuación en la Figura 2, donde las zonas más afectadas actualmente son los departamentos de Antioquia, Meta, Caquetá, Nariño y Norte del Santander. Antioquia presenta el mayor número de víctimas de minas antipersonales desde 1990 hasta marzo de 2018.

Figura 2. Situación Nacional de Víctimas Antipersonal en Colombia (2019)



Fuente: DIRECCIÓN PARA LA ACCIÓN INTEGRAL CONTRA MINAS ANTIPERSONALES. 30 de marzo de 2019, [revisado en 24 de abril de 2019] Disponible en internet <http://www.accioncontraminas.gov.co/accion/desminado/Documents/170713-Anexol-Victimas.zip>

Si deseamos verificar los costos económicos generados por el uso de las minas antipersonales cuando una persona es víctima de esta trampa mortal, se deben analizar los costos directos de este hecho, los cuales representan la remuneración

⁹ DIRECCIÓN PARA LA ACCIÓN INTEGRAL CONTRA MINAS ANTIPERSONALES. [En línea] 30 de marzo de 2019, [revisado en 28 de abril de 2019] disponible en internet: <http://www.accioncontraminas.gov.co/estadisticas/Paginas/victimas-minas-antipersonal.aspx>

de factores necesarios para la producción de un bien o servicio y los indirectos los cuales no implican necesariamente una asignación directa de recursos, pero sí representan un costo de oportunidad o un uso alternativo no utilizado de los factores. De acuerdo a la estadística obtenida por la Dirección Nacional de Planeación, desde 1990 hasta 2002 la atención a víctimas le ha costado al país un total de \$8.614,6 millones de pesos es decir US\$3,4 millones de dólares donde reflejamos en la siguiente tabla¹⁰

Tabla 2. Costo de víctimas antipersonales

TIPO	Número de Heridos	Costo	
		Millones de \$	US. \$
Civiles	269	1.959,7	781,365.3
Militares	1.423	6.665,0	2.653,494.1
Total	1,692	8.614,7	3.434,859.4

Fuente: LAHUERTA, Y. Impactos económicos generados por el uso de Minas Antipersonal en Colombia. *Archivos de Economía*, 2004, no 235.

De acuerdo a la Tabla 2, el costo por cada herido por una MAP se estima en \$5.091.430 (cinco millones de pesos aproximadamente), es decir que, de acuerdo al informe presentado por la Dirección Contra Minas desde 1990 hasta octubre 31 de 2017 se presentaron gastos aproximadamente entre \$56.499 millones de pesos lo que equivale a unos \$34 millones de Dólares. Este reporte puede variar de acuerdo a los costos unitarios de atención para víctimas militares, los cuales se calcularon a partir de los gastos generales anuales de sanidad de ejército entre 1996 – 2002. Para el caso de las víctimas civiles se utilizaron los mismos datos militares, debido a la escasez de información que se presentaba en ese momento utilizando la moda de los datos anteriormente mencionados, suponiendo que todas las personas que reciben algún tipo de accidente pos Minas Antipersonales en sanidad militar reciben el mismo tratamiento en cualquier centro asistencial de salud.

Para la erradicación de las minas antipersonales en Colombia la Dirección Nacional de Planeación realizó un estudio en el 2002 para conocer, de acuerdo con los diferentes escenarios, cuanto le costaría al país erradicar las minas antipersonales. Ahora si se tiene en cuenta el área minada de Colombia comparada con otros países, somos los primeros en la lista de acuerdo con la extensión de territorio minado, el cual es de 200.000 kilómetros cuadrados con un número sembrado de

¹⁰ LAHUERTA, Y. Impactos económicos generados por el uso de Minas Antipersonal en Colombia. Colombia, Departamento Nacional de Planeación, Dirección de Estudios Económicos, Bogotá, 2003. Vol. 235.

70.000 minas antipersonales, aproximadamente un 17,52% del territorio nacional, con una tasa de crecimiento anual del 1,84%. Para obtener estos datos la Dirección Nacional de Planeación realizó comparativos con Honduras y Nicaragua¹¹.

En la Tabla 3 se muestran los escenarios seleccionados para realizar la comparación de costos para desminados en Colombia: paz con cumplimiento del tratado de Ottawa 10 años o solicitando una prórroga de éste a 20 años y guerra a un término de 10 años, solicitando una prórroga del Tratado de Ottawa a 20 años. Los equipos de desminado se encuentran conformados de la siguiente manera: el equipo A es un grupo de 150 personas relacionadas directamente con el desminado y un equipo de apoyo de alrededor de 50 personas, el cual estará encargado de velar por la seguridad del grupo. De las 150 personas que lo conforman, 42 son detectoristas, 42 sondeadores, 21 explosivistas, 21 paramédicos, 21 comandantes y 3 médicos. El equipo B, tiene la misma estructura utilizada por el escuadrón de desminado de Afganistán. Este grupo está compuesto por 30 personas de las cuales 24 son detectoristas (quienes también realizan funciones de sondeadores), 3 explosivistas, 1 paramédico, 1 médico y 1 comandante¹².

Tabla 3. Comparación de costos para Desminado en Colombia

Equipo A	No equipos	Inversión inicial		Costo anual		Costo total	
		Dólares	\$ millones	Dólares	\$ millones	Dólares	\$ millones
Conflicto 10 años, desminado 20 años	8	8.695.485	20.280	2.226.430	5.192	53.224.087	124.129
Paz, desminado 20 años	6	7.088.765	16.532	1.677.595	3.912	40.640.656	94.782
Paz, desminado 10 años	12	11.908.925	27.774	3.324.101	7.752	45.149.936	105.298

Equipo B	No equipos	Inversión inicial		Costo anual		Costo total	
		Dólares	\$ millones	Dólares	\$ millones	Dólares	\$ millones
Conflicto 10 años, desminado 20 años	29	8.292.447	19.340	682.386	1.591	21.940.173	51.169
Paz, desminado 20 años	24	7.253.854	16.917	570.094	1.330	18.655.724	43.509
Paz, desminado 10 años	39	12.446.821	29.028	1.131.558	2.639	23.762.397	55.418

Fuente: LAHUERTA, Yilberto; ALTAMAR, Ivette María. 2002, vol. 178.

Según el tratado Ottawa, el cual se ratificó el primero de marzo de 2001, se tenía un plazo máximo para eliminar las minas antipersonales del país para el 1 de marzo del 2011. De acuerdo a la cronología establecida por la Dirección de Minas, en el 2002 mediante ley 758 del 2002 se le confiere la responsabilidad al Ministerio de Defensa Nacional de destruir las minas que se encuentran en el territorio

¹¹ LAHUERTA, Op. Cit., p. 14

¹² Ibid. p. 37

colombiano. En 2005 en las 35 bases militares se inicia la destrucción de minas antipersonales. Consecuentemente, en 2009 se crea el batallón No. 60 “Coronel Gabino Gutiérrez” para Desminado Humanitario. En el 2010 de acuerdo al plazo establecido el 1 de marzo de 2011 en el tratado Ottawa, se da cumplimiento a la destrucción de minas antipersonales que se encontraban en 35 bases militares, sin embargo, en el artículo 5 del tratado en mención, no puede cumplirse debido a la problemática por parte de los grupos armados al margen de la ley. Se concede prórroga a 1 de marzo de 2021. De acuerdo a la ley 1421 de 2010 se autoriza el desminado humanitario a organizaciones civiles con su correspondiente acreditación. De lo anterior se autorizó en 2013 a la organización civil *THE HALO TRUST* acreditada por la gobernación de Antioquia, la cual comienza a operar en: Nariño, el Carmen de Viboral, la unión, San Rafael y Sonsón.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una aeronave no tripulada adaptando un detector de metales para la búsqueda de minas antipersonales.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las tecnologías existentes con el fin de seleccionar la mejor opción para el proyecto.
- Diseñar una aeronave no tripulada que, al ser integrada con el detector de metales, cumpla la misión, logre un vuelo óptimo y las condiciones de estabilidad aerodinámicas para el reconocimiento de zonas minadas
- Efectuar la simulación dentro de la plataforma establecida para realizar la programación de misiones de detección y destrucción de minas.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Por lo anterior se puede presentar un alto riesgo en la detección de minas antipersonales para las personas que se encuentran desarrollando esta labor de búsqueda.

El presente proyecto propone reducir este riesgo para el personal que se encuentra realizando el desminado, teniendo en cuenta que una vida no se puede remplazar, y estas personas arriesgan su integridad para cumplir esta labor, sin contar con los costosos tratamientos de recuperación física y mental que debe pasar una víctima de minas antipersonales. Al implementar un vehículo aéreo no tripulado con un detector de metales, permite ubicar los posibles lugares donde se encuentren estos artefactos explosivos, disminuyendo el factor de accidentalidad. De igual manera es posible reducir los costos operacionales, los cuales incluyen el entrenamiento de las personas, el desplazamiento equipo de seguridad de estas personas. Esta tecnología desarrollada puede utilizarse en el desminado militar que actualmente se encuentra adelantando el gobierno de acuerdo con las operaciones militares que se planea.

¿CÓMO INTEGRAR LAS TECNOLOGIAS EXISTENTE QUE NO PERMITAN REALIZAR LA DETECCIÓN DE MINAS ANTIPERSONALES REDUCIENDO LAS VICTIMAS HUMANAS?

De la anterior pregunta surge a la propuesta donde se prueba la siguiente hipótesis, Integrando la tecnología de aeronaves no tripuladas con el detector de metales es posible, desarrollar una aeronave no tripulada que tenga la capacidad de realizar vuelos en una zona determinada donde se presenta el riesgo de minas antipersonales, de tal forma que efectúe misiones específicas en este terreno efectuando un barrido por esta zona, detectando las minas antipersonales logrando reducir el riesgo de la persona que manipula el detector de metales.

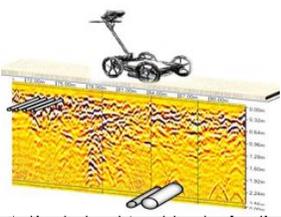
2. CAPITULO MARCO TEÓRICO

Actualmente en Colombia se han presentado un total de 11.735¹³ personas que han sido víctimas de minas antipersonales donde el Gobierno ha buscado la manera de detener este avance con diferentes programas, métodos y ayuda disponible ya sea de medios humanos o tecnológicos que permitan desminar el país. Este capítulo muestra los sistemas que actualmente se utilizan para desminar y neutralizar las minas antipersonales, y las tecnologías que se desarrollan para este medio.

2.1. SISTEMAS DE BÚSQUEDA DE MINAS ANTIPERSONALES

Para la búsqueda de minas antipersonales se han utilizado varios métodos los cuales se describen a continuación:

Tabla 4 Métodos para la detección de minas.

TIPOS DE DETECTORES	FUNCIONAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	ILUSTRACION
RADAR DE PENETRACION TERRESTRE.	Emiten ondas de radio que penetran la tierra y las antenas detectan las ondas reflejadas por el subsuelo, generando una imagen donde se puede identificar anomalías u objetos extraños	Permite tener claridad si realmente es un objeto metálico o/u otro elemento	Como los detectores de metal presenta inconvenientes para la detección de minas, debido a los numerosos objetos como rocas que pueden tener una similar forma a la de una mina.	
TOMOGRAFIA DE IMPEDANCIA ELECTRICA.	Por medio de la conductividad eléctrica del suelo mediante un conjunto de electrodos estimulados eléctricamente, los cuales se ponen sobre una superficie del suelo midiendo los potenciales eléctricos (campos eléctricos) en diferentes puntos que se han generado. La conductividad eléctrica es el cociente entre la densidad de corriente de	Método de bajo costo, por tratarse que cualquier objeto enterrado cerca presenta una discontinuidad en la distribución eléctrica.	Ya que los contactos que se colocan en el suelo pueden ocasionar la activación de una mina antipersonal	

¹³ DIRECCIÓN PARA LA ACCIÓN INTEGRAL CONTRA MINAS ANTIPERSONALES. [En línea] 30 de marzo de 2019, [revisado en 24 de abril de 2019] disponible en internet: <http://www.accioncontraminas.gov.co/estadisticas/Paginas/victimas-minas-antipersonal.aspx>

TIPOS DE DETECTORES	FUNCIONAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	ILUSTRACION
	conducción y el campo eléctrico			
SISTEMA ACUSTICO	Consiste en la emisión de ondas sonoras de baja frecuencia (menos de 1.000 Hz), donde penetra los poros de la tierra los cuales chocan con los objetos que se encuentra bajo tierra, generando pequeñas vibraciones acústicas las cuales se hacen más fuertes debido al efecto de resonancia	Técnica no se ve afectada por el tipo de suelo	No detecta metales a grandes profundidades no mayor a 30 cm. (Método que solo aplica para terrenos superficiales)	
RETRODISPERSIÓN	Técnica consiste en la emisión de rayos X que penetran la superficie de la tierra, La dispersión de los rayos emerge por encima del suelo y luego se intercepta por un detector, el cual transmite los datos a un software que proporciona una imagen del objeto (similar a un negativo fotográfico)	Se estima que el tiempo necesario para reproducir una imagen es de 1 min por m2.	Debido a que su método es por rayos X es una técnica no utilizable en suelos húmedos, ya que la atenuación del agua antes y después de la dispersión es considerable y distorsiona la imagen obtenida.	
METODO INFRARROJOS	Las minas antipersona emiten radiación térmica más intensa (más calientes) que la superficie de la tierra cuando sus cubiertas son metálicas (buen conductor térmico), y viceversa cuando sus cubiertas son plásticas (aislantes térmicos)	La medición de radiación infrarroja se puede aplicar a distancia y puede abarcar grandes áreas	El método infrarrojo depende de las condiciones del clima (velocidad y humedad del viento), condiciones y composición del terreno (vegetación, humedad del terreno, contenido de minerales), posición y profundidad en que se encuentre la mina	
ANIMALES	Los perros tienen una gran habilidad como se ha demostrado en otros campos, gracias a su excelente sentido del olfato y se les puede entrenar para detectar compuestos nítricos de los explosivos	Con un excelente entrenamiento permite la localización de las minas antipersonales.	Los inconvenientes de este método dependen de factores como el clima, el cansancio del canino, el entrenamiento tanto del perro como del instructor y la existencia de otros olores que utilizan en las minas para distraer al canino, como cebo, estiércol, u orina de perras	

2.2. SISTEMAS DE NEUTRALIZACIÓN DE MAP

En la Tabla 5 se observan los diferentes sistemas de neutralización de minas antipersonales donde se establece los métodos utilizados para la neutralización las cuales pueden ser en forma individual o masiva, realizado con una persona entrenada o en forma masiva donde se desea destruir un campo minado, la gran mayoría de minas detectadas para agilizar el proceso de desminado, aunque en algunos casos se presentan inconvenientes que no permite la seguridad de la zona en un 100%.

Tabla 5. Sistema de neutralización de minas

FORMA	MÉTODO	FUNCIONAMIENTO	INCONVENIENTES	
Individual	Desactivación y remoción	Desactivación in situ y posterior traslado.	Lento y arriesgado requiere un especialista.	
	Dstrucción	Dstrucción in situ, generalmente mediante una pequeña carga explosiva.	Lento. Más seguro que desactivación y remoción, pero más caro.	
Masivo	Medios mecánicos	Apisonado	Mediante vehículos especiales provistos de un rodillo que va apisonando el terreno.	Desgaste del rodillo. Poco eficaz en terreno irregular, blando o de defensa, vegetación, limpieza parcial.
		Golpeo	Mediante vehículos especiales provistos de cadenas que, montadas sobre un tambor giratorio, golpean el suelo.	Desgaste de las cadenas. Poco eficaz en terreno irregular. Riesgo de hundir las minas. Limpieza parcial.
		Remoción	Mediante vehículos especiales provistos de una hoja dentada que remueve el terreno desplazando tierra y minas a los lados.	Las minas no explotan, excepto las que llevan dispositivos antiremoción. Lentitud, limpieza parcial.
	Explosivos	Cargas alargadas	Largos tubos rellenos de cargas explosivas que se colocan sobre el terreno.	Difícil colocación exacta. Costoso. Daños ambientales. Limpieza parcial.
		Gases	Contenidos en granadas, cohetes que se disparan sobre la zona.	Efecto supeditado a la altura de la explosión y a la composición del gas. Daños ambientales. Limpieza parcial.
	Fuego		Incendio controlado de la zona.	Útil en campos de minas esparcibles, con densa vegetación. Limpieza parcial.

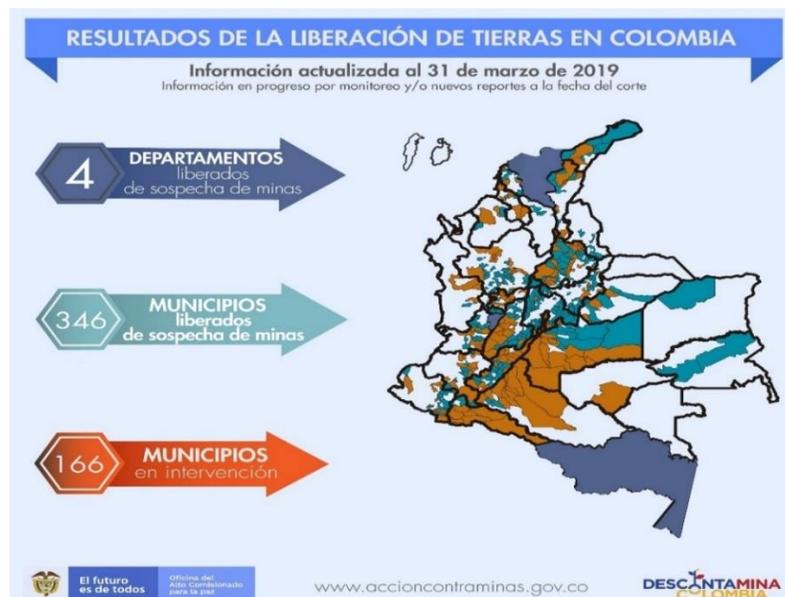
Fuente: PERCIPIANO, Yilberto Lahuerta; CONSUEGRA, Ivette María ALTAMAR. La erradicación de las minas antipersonal sembradas en Colombia: implicaciones y costos. DNP, 2002.

De igual manera si se analiza las técnicas de desminado humanitario, en la Dirección Nacional Contra Minas se utilizan dos métodos:

- Manual: es el proceso por el cual un experto en desminado realiza la detección de las minas antipersonales, la cual la deja al descubierto para que expertos en neutralización de minas la desactiven o destruya de acuerdo con los estándares nacionales e internacionales. Los equipos utilizados para la detección de minas son, detector de metales el cual debe estar calibrado de acuerdo al fabricante y una sonda o equipo de excavación.
- Mecánico: el cual se utiliza equipos barreminas los cuales son controlados a control remoto o pueden ser tripulados y su función es la destrucción de minas antipersonales de acuerdo con los estándares nacionales e internacionales.

A continuación, en la Figura 3 se observa que, a marzo del 2019, 346 municipios se encuentran libre de sospecha, con esta cifra se logran 4 departamentos actualmente libre de sospecha de minas y 166 municipios que actualmente se encuentran realizando labores de búsqueda y destrucción de minas antipersonales.

Figura 3. Resultados de la Liberación de tierras en Colombia



Fuente: Fuente: DIRECCIÓN PARA LA ACCIÓN INTEGRAL CONTRA MINAS ANTIPERSONALES. 30 de marzo de 2019, [revisado en 24 de abril de 2019] Disponible en internet http://www.accioncontraminas.gov.co/Prensa/PublishingImages/FULL%20Info_DH-01.jpg

2.3. AERONAVES NO TRIPULADAS

Definiremos el término “vehículo aéreo no tripulado” en inglés Unmanned Aerial

Vehicle, UAV utilizado en los años 90 con el fin de describir aeronaves robóticas. Tiempo después se remplazó utilizando el término vehículo aéreo pilotado remotamente (Remotely Piloted Vehicle, RPV).

En el documento «Joint Publication 1-02, Department of Defense Dictionary» editado por el Ministerio de Defensa de los Estados Unidos define UAV como:

“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. No se consideran UAV a los misiles balísticos o semibalísticos, misiles crucero y proyectiles de artillería”.¹⁴

2.3.1. Historia de las aeronaves no tripuladas y avances en el campo de desminado

Uno de los primeros registros obtenidos a través de los diferentes textos e información digital a cerca de drones que detecten minas antipersonales empieza a partir de año 2015, debido a que son la integración de dos tecnologías que logran tener mayor confiabilidad y menor riesgo para los operadores que detectan las minas antipersonales. A partir de allí la empresa catalana CAT UAV sobrevuela los Balcanes en busca de explosivos olvidados de la Guerra.¹⁵

Por lo anterior esta tecnología no ha sido tan explorada, ya este tipo de vehículo aéreo no tripulado que cuenta con diferentes aplicaciones pero en detección de minas son muy escasos los estudios que se han realizado, por lo tanto según el trabajo final de dos estudiantes de ESPAÑA, empiezan a construir un prototipo para intentar solventar la problemática de minado generando cálculos y simulaciones donde sus conclusiones a partir de un drone hexacopter y por medio del estudio de deformación de brazos con la utilización de galgas extensiométricas utilizando como detector el georradar¹⁶.

Por otra parte, un grupo de ingenieros COLOMBIANOS en el año 2016, crean una alianza con la no gubernamental Corporación Colombia Desminando, entidad que les ha permitido conocer aliados tecnológicos para probar, desarrollar y aplicar la tecnología.

Permitiendo llegar a estudios que tratan de cámaras hiperspectrales cuyos

¹⁴ CUERNO REJADO, Cristina. Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad. *Dyna*, 2016, vol. 91, no 3, p. 282-288.

¹⁵ EL ESPAÑOL, 4 de noviembre del 2015, drones españoles para detectar las minas de Bosnia [archivo de video], Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=6ks0H-2JJWo>

¹⁶ SERRANO CORDERO, Cristian; PÉREZ CURUTCHET, Omar. Análisis, diseño estructural y construcción de un dron para la detección de minas antipersona. 2016. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica de Catalunya.

espectros de visión se multiplican frente a las cámaras tradicionales, aumentando las posibilidades de hallar anomalías en el terreno y permitiendo ver detalles que no capta el ojo humano mientras se desplaza el dron, teniendo en cuenta que solo fueron estudios en fase de desarrollo técnicos, por lo cual no se localizaron estudios de prototipo ya construido bajo esas mismas características.¹⁷

Para el avance de seguridad territorial y por medio de drones un grupo de estudiantes de la universidad de Wisconsin, diseñan un dron que a través de fusión interna cuya principal función es enviar neutrones, donde el dispositivo integra sensores que hacen lectura de rayos gamma los cuales se encargan de buscar los materiales que pueden contener explosivos¹⁸

Otro de los novedosos sistemas de detección de minas antipersonales con drones en el año 2016, conocido como el MINE-KAFON determina tres etapas básicas para la detección de la mina (Mapea, Detecta, Detona la mina), la cual permite simultáneamente realizar esos tres pasos en un solo desplazamiento del dron, generando la eliminación de la mina antipersonal¹⁹

Figura 4 Drone mine kafon con sus tres etapas.



Fuente: ECHEVERRY, Manuel. El Mine Kafon Drone es el primer dron antiminas del mundo, [En línea] 16 Agosto 2016 [revisado el 20 septiembre 2018] disponible en internet: <https://i1.wp.com/www.ungeekencolombia.com/wp-content/uploads/2016/08/Mine-Kafon-Drone-en-accion.jpg>

Sin embargo, es de resaltar los trabajos de detección de minas con drones en BARCELONA en el año 2016, dos estudiantes de ingeniería mecánica diseñan un

¹⁷ SPUTNIK, Colombianos desarrollan drones para detectar minas antipersonales, [En línea] 12 de julio 2016 [revisado 19 de julio 2018] disponible en internet: <https://sptnkne.ws/cmrD>.

¹⁸ SCHULTZ Rob, Bomb-sniffing drone technology developed at UW-Madison could save lives [En línea] 24 de abril del 2016 [revisado el 20 de septiembre 2018] disponible en internet: https://madison.com/wsj/news/local/education/university/bomb-sniffing-drone-technology-developed-at-uw-madison-could-save/article_498e9cb0-f638-5a91-8899-40be16ab6d29.html

¹⁹ VINCENT, James. This drone can detect and detonate land mines. The Verge. [En línea] 19 de julio 2016, [revisado el 28 de septiembre de 2018] disponible en internet: <https://www.theverge.com/2016/7/19/12222104/landmine-detecting-drone-mine-kafon-drone>

prototipo que permite detectar la mina antipersonal incorporando cámara, sistema de GPS y materiales de bajo costo para que puedan reemplazar dichas piezas fácilmente no obstante es mencionar que el método de detección que están utilizando le corresponde emitiendo diferentes sonidos

De manera que a lo largo del tiempo han evolucionado dichos sistemas de detección de manera que permitiendo llevar mayor alcance al momento de detectar minas, por lo tanto, en la universidad de VIGO, en el presente año patentan una propuesta para la detección de minas, la cual se toma a partir de radares que emite ondas de radiofrecuencia capaces de atravesar el suelo y las paredes y capta la respuesta de posibles objetos ocultos. Combinando distintas medidas, se obtiene una imagen de alta resolución de dichos objetos. Las principales ventajas del sistema desarrollado sobre los radares montados en vehículos terrestres son una mayor velocidad de escaneo y que se evita el contacto con el suelo, lo que aumenta la seguridad en la detección de artefactos explosivos como minas antipersonales, permitiendo detectar objetos metálicos y no metálicos, teniendo como autonomía de vuelo entre los 15 a 20 min.²⁰

2.3.2. Configuraciones de un drone

De acuerdo al número de motores y la distribución de los mismos, podemos hablar de las diferentes configuraciones que pueden tener los drones los cuales podremos observar a continuación.

Tricopteros

Este tipo de drone utiliza tres motores los cuales dos de ellos se encuentran ubicados en su frente quienes giran en sentido horario y el otro motor en su cola girando en sentido antihorario. El motor de cola posee un servomotor independiente el cual le permite realizar las diferentes maniobras como el yaw, pitch y roll. Este tipo de drones es muy inestable y difícil de manejar, aunque tiene una ventaja la cual es que puede alcanzar velocidades considerables.²¹

Cuadricoptero

Este tipo de drone posee cuatro motores distribuidos a 90 grados equitativamente con el fin de mantener el equilibrio de fuerzas. Es uno de las configuraciones más estables y la distribución de los motores permite que se tenga varios usos. De acuerdo a la ubicación de la tarjeta madre puede configurarse con un motor en

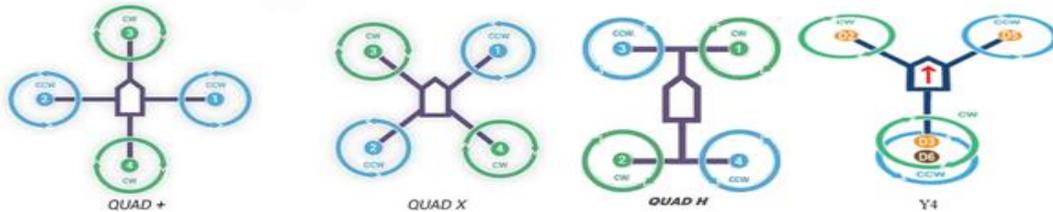
²⁰ PENELAS, Sandra. Vigo patenta drones que detectan minas antipersona y miden antenas. Faro de Vigo [en línea] 18 de abril 2018 [revisado 04 de octubre 2018] disponible en internet:

<https://www.farodevigo.es/gran-vigo/2018/04/18/vigo-patenta-drones-detectan-minas/1874820.html>

²¹ LIANG, Oscar. Tipos de Multirrotores. En: Oscarliang.com. Noviembre del 2016, disponible en internet: <https://oscarliang.com/types-of-multicopter/>

frente (QUAD+) o con los motores a los costados (QUADX) con el fin de permitir una mayor visibilidad a la cámara. De igual manera se puede configurar los motores en forma de tricóptero con la excepción de que el motor de cola tendrá 2 motores con el fin de suprimir el servomotor que es necesario en el tricóptero ya que al variar las velocidades de los motores de cola, permitirá obtener los diferentes movimientos como el yaw, el pitch y el roll.

Figura 5 Configuraciones con 4 motores

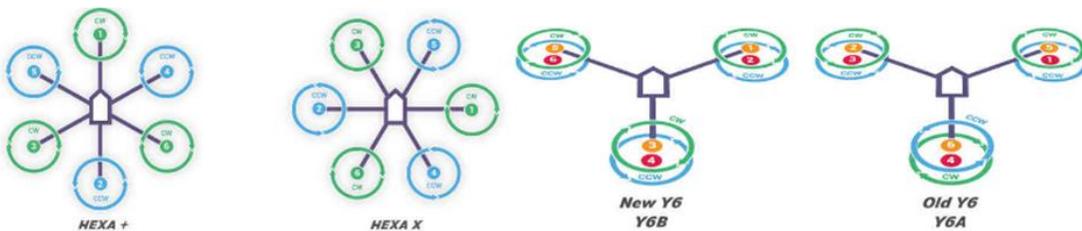


Fuente: <http://ardupilot.org/copter/docs/parameters.html#frame-type>

Hexacóptero

Este tipo de configuración permite obtener una mayor agilidad del drone, además de poseer una ventaja a la anterior configuración, debido a que puede levantar mayor peso o de presentar avería en algún motor, puede aterrizar sin ningún problema, gracias a la configuración de la tarjeta madre. La configuración de este drone como en el anterior se puede realizar con un motor en al frente (HEXA+) o con los motores a los costados (HEXAX). También puede realizar su configuración en tipo tricóptero, pero con dos motores en cada brazo, mejorando la maniobrabilidad de esta configuración.

Figura 6 configuraciones con seis motores

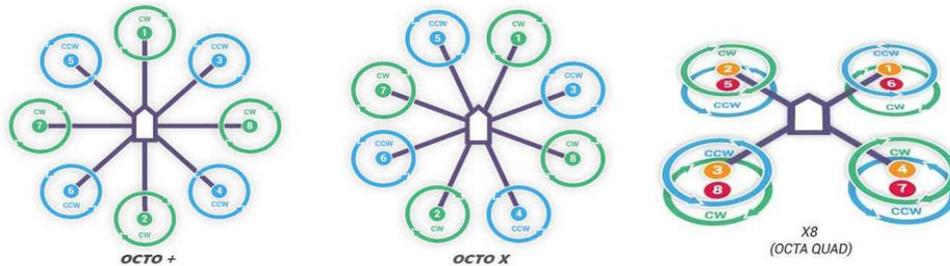


Octocóptero.

Este tipo de configuración de drones consta de 8 motores los cuales pueden configurarse en tipo OCTO+ el cual se ubica un motor al frente, o en configuración OCTOX el cual se ubican los motores al costado. De igual manera se puede configurar el drone en tipo cuadricóptero colocando doble motor en cada brazo lo cual permite optimizar el espacio del drone y genera una mayor maniobrabilidad, ahorro de peso y mayor distribución de las fuerzas que se generan. Este tipo de

drone se utiliza para trabajos pesados como cargas, fotografías o videos profesionales.

Figura 7 Configuración de 8 motores



2.3.3. Clasificación

Los vehículos aéreos no tripulados pueden utilizarse en cualquier campo que se requiera de acuerdo a la necesidad que se desee suplir. Dado que no hay una clasificación estandarizada de los drones se dará a continuación una breve taxonomía de clasificación utilizada.

Broke Hoollan clasifica los drones en tres clases. Clase I se encuentra subdividida en categoría (a, b, c, d) y este proceso de categorización se realiza de acuerdo al peso mínimo de despegue, combinado su uso y su expectativa de operación.²²

Tabla 6. Propuestas de Categorización por Brooke - Holland basada en el peso

Clase	Tipo	Rango del peso
Clase I (a)	Nano drones	$W \leq 200$ kg
Clase I (b)	Micro drones	$200g < W \leq 2$ kg
Clase I (c)	Mini drones	$20kg < W \leq 20$ kg
Clase I (d)	Drones pequeños	$20kg < W \leq 150$ kg
Clase II	Drones tácticos	150 kg $< W \leq 600$ kg
Clase III	MALE/	$W \geq 600$ kg

Fuente: Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences, Volumen 91, Pagina: 99–131. <https://doi.org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

Para Arjomandi et al, la clasificación de los drones se basa en el peso rango y duración, peso de las alas, resistencia, máxima altitud, y tipo de motores la clasificación de los drones está en súper pesado con peso mayor a 2.000 kg, el pesado con un peso de 200 kg y 2.000 kg, mediano con peso de 50 kg y 200 kg, livianos/pequeños menores a 5 kg.

²² Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress In Aerospace Sciences, 9199-131. doi:10.1016/j.paerosci.2017.04.003

Tabla 7. Propuesta de Categorización por Arjomandi et al basado en el peso

Denominación	Rango del peso
Súper Pesado	$W > 2000 \text{ kg}$
Pesado	$200 \text{ kg} < W \leq 2000 \text{ kg}$
Mediano	$50 \text{ kg} < W \leq 200 \text{ kg}$
Ligero	$5 \text{ kg} < W \leq 50 \text{ kg}$
Micro	$W \leq 5 \text{ kg}$

Fuente: Hassanalain, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences, Volumen 91, Pagina: 99–131. <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

Weibal y Hasman clasifican los drones en micro, mini, táctico, medio y mayor altitud y pesado.

Tabla 8. Propuesta de Categorización de Drones por Weibel y Hasman basada en el peso

Denominación	Rango del peso
Micro	$W < 2 \text{ lbs}$
Mini	$2 \text{ lbs} \leq W \leq 30 \text{ lbs}$
Táctico	$30 \text{ lbs} \leq W \leq 1.000 \text{ lbs}$
Mediano y mayor altitud	$1.000 \text{ lbs} \leq W \leq 30.000 \text{ lbs}$
Pesado	$W \geq 30.000$

Fuente: Hassanalain, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences, Volumen 91, Pagina: 99–131. <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

Tabla 9. Propuesta de Categorización de Drones por Zakora y Molodchik basado en el peso y rango de vuelo

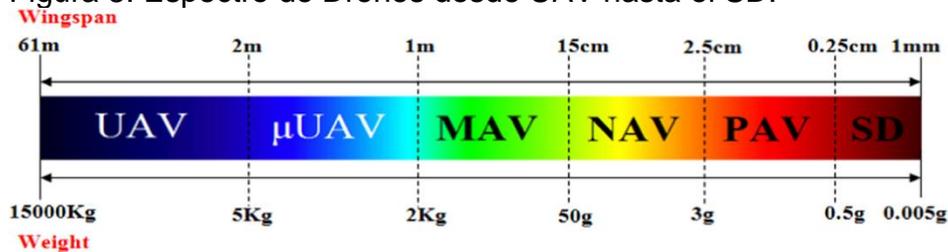
Denominación	Rango del peso	Rango de vuelo
Micro y mini UAV rango Cerrado	$W \leq 5 \text{ kg}$	$25 \text{ km} \leq R \leq 40 \text{ km}$
UAV ligero de pequeño rango	$5 \text{ kg} < W < 50 \text{ kg}$	$10 \text{ km} \leq R \leq 70 \text{ km}$
UAV ligero de mediano rango	$50 \text{ kg} < W < 100 \text{ kg}$	$70 \text{ km} \leq R \leq 250 \text{ km}$
UAV mediano	$100 \text{ kg} < W < 300 \text{ kg}$	$150 \text{ km} \leq R \leq 1.000 \text{ km}$
UAV medio pesado	$300 \text{ kg} < W < 500 \text{ kg}$	$70 \text{ km} \leq R \leq 300 \text{ km}$
Rango Medio Pesado	$500 \text{ kg} < W$	$70 \text{ km} \leq R \leq 300 \text{ km}$
UAV Pesado de Larga Resistencia	$1500 \text{ kg} < W$	$R \leq 1500 \text{ km}$
Aeronave de Combate sin tripulación	$500 \text{ kg} < W$	$R \leq 1500 \text{ km}$

Fuente: Hassanalain, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences, Volumen 91, Pagina: 99–131. <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

Zakora y Molodchik clasifica los drones basados en su peso y su rango como: Micro y mini UAV rango Cerrado, UAV ligero de pequeño rango, UAV ligero de mediano rango, UAV mediano, UAV medio pesado, Rango Medio Pesado, UAV Pesado de Larga Resistencia, Aeronave de Combate sin tripulación. También clasificaron los drones de acuerdo a sus misiones, a saber, (1) atacar varias aplicaciones de UAV, (2) atacar UAV reemplazables, (3) UAV estratégico, (4) UAV táctico y (5) UAV en miniatura.

Diferentes tipos de drones evolucionaron a partir de la miniaturización de componentes electrónicos, como sensores, microprocesadores, baterías, y sistemas de navegación. Hay una gran variedad de drones, desde el enorme vehículo no tripulado UAV de ala fija, hasta el polvo inteligente, que consiste en muchos pequeños sistemas micro electromecánicos, incluidos sensores o robots.

Figura 8. Espectro de Drones desde UAV hasta el SD.



Fuente: Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress In Aerospace Sciences, 9199-131. doi:10.1016/j.paerosci.2017.04.003

Existe un espectro expandido de drones de la clase UAV con una envergadura máxima de 61 mts y un peso de 15.000 kg a polvo inteligente (SD) con un tamaño mínimo de 1 mm y un peso de 0.005 kg. Entre el UAV y el SD, se define un espectro de varios tipos de drones, los cuales son llamados micro drones, tal como el micro vehículo aéreo no tripulado (μ UAV), micro vehículo aéreo (UAV), el micro vehículo aéreo, el nano vehículo aéreo (NAV) y el pico vehículo aéreo (PAV).

2.3.4. Aplicaciones

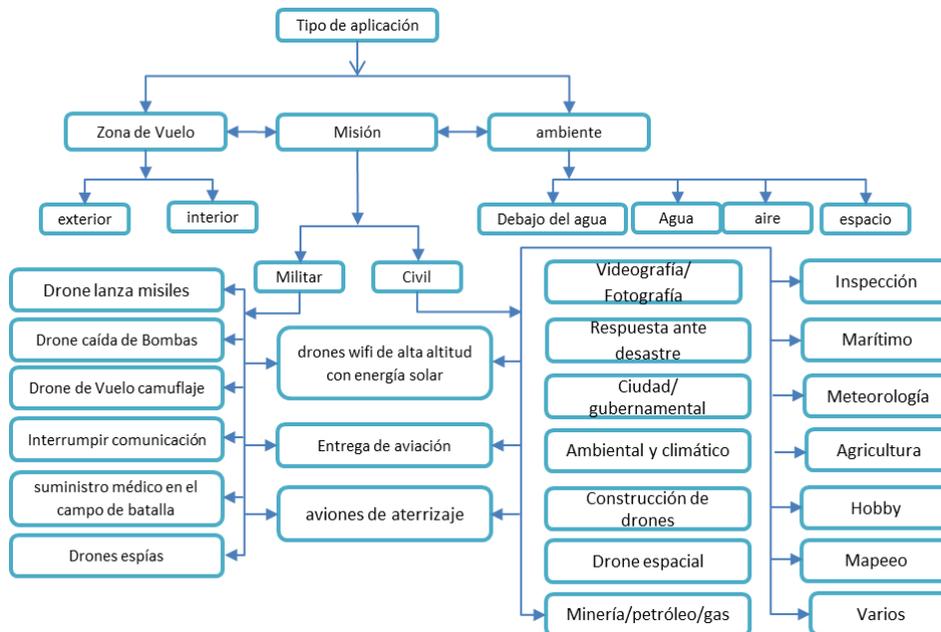
Para la aplicación de los drones, se puede hablar de una amplia gama de usos, si hablamos de donde puede volar, si lo realizara en el exterior o interiores como edificios, o hablar de la misión que va a realizar; si es civil o militar, también del tipo de ambiente, como puede ser debajo del agua, sobre el agua, en el aire o incluso en el espacio.

Como se muestra en la Figura 9, hoy en día se observa una gran variedad de aplicaciones para los drones, sin embargo, se pueden tener más de 200 aplicaciones de acuerdo con su tipo. Un ejemplo de ello son los drones de búsqueda y rescate, de protección ambiental, misiones en océanos y hasta drones para misiones espaciales. De igual manera los drones pueden ser equipados con cámaras donde pueden proporcionar una descripción rápida alrededor de un

objetivo señalado, o drones con infrarrojos para dar imágenes en la oscuridad efectuando un reconocimiento acertado.

De igual manera su tamaño es de suma importancia para la misión encomendada. Un ejemplo de ello es el reconocimiento dentro de edificios. Los drones pequeños pueden ser utilizados para reconocimiento dentro de cualquier edificio que pueda encontrarse bajo alguna amenaza biológica, nuclear o química.

Figura 9. Clasificación de drones según su aplicación



Fuente: Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences, Volumen 91, Pagina: 99–131. <https://doi.org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

2.3.5. Componentes de un Drone

CHASIS: Es el cuerpo del drone; en él se soporta todas las piezas; se considera como la estructura principal debido a que es la columna del dispositivo del drone, además en él se tiene generalmente tres tipos de materiales con la que están hechos.

1. Fabricados de Fibra de Carbonó: Se considera uno de los materiales más resistentes, sus principales características es que es poco peso, resistente a la corrosión, a la humedad y

Figura 10 Chasis de un drone



muy resistente al calor dependiendo del módulo de elasticidad con la que fue elaborado, ya que es obtenido del poliacriloniato.

2. Fibra de Vidrio: Es un material considerado de refuerzo para plásticos moldeados y laminados, forman hilos de tela de vidrio permitiendo ser flexible, muy resistente al calor, ligero, aislante eléctrico; dando lugar a un material compuesto extremadamente fuerte y duradero.
3. Plástico: Material biodegradable y permite ser reutilizado, hoy en día para los chasis de los drones los investigadores de STANFORD y de la NASA, son los pioneros en realizar estas técnicas como ayuda al medio ambiente evolucionando ya que obtiene resistencia con ayuda de otros materiales como micelios (la raíz y hongos) cultivados en un molde.

MOTORES: Los Motores se encargan de hacer funcionar el drone los que le dan iniciación al dispositivo, transformando la energía eléctrica en un movimiento circular que pasa a las hélices del drone y causara su debido empuje para poder generar el alcance del vuelo, de manera que ellos se clasifican según la cantidad de empuje que se requiere y dependiendo de la hélice y del voltaje requerido para elegir un motor. Siendo como requerimiento aportar mayor eficiencia, autonomía al drone y misión que cumpla, ejemplo como se cita en Figura 13 *Chasis de DRONE en plástico Biodegradable*, Figura 14 y Figura 15, donde se muestra algunas configuraciones

Figura 11 Fibra de Carbono



Figura 12 Fibra de vidrio



Figura 13 Chasis de DRONE en plástico Biodegradable



Figura 14 Motor Drone de Carreras



de motores para diferentes misiones como lo son Drone de carreras en la Figura 13 *Chasis de DRONE en plástico Biodegradable*, Drone de Juguete Figura 14 y finalmente la 27, motor para un drone profesional.

Sin embargo, ellos también en la selección de un motor son de acuerdo al peso total del drone, el rango que debe tener de torque ya que con ello se define la cantidad de RPM deseados. Y se encuentran dos tipos de ellos como lo son:

1. Motor CC Cepillado: corriente continua poseen un armazón rotativo que funciona como un electro magneto con dos polos. Un interruptor rotativo está conectado y ayuda a revertir la dirección de la corriente para cada medio ciclo, para que los polos puedan ser empujados o halados contra los imanes permanentes conectados fuera del motor.
2. Motor CC sin Cepillado: corriente continua no poseen cepillos, solo tienen un imán permanente y este se invierte con los cambios de la polaridad magnética. Sus movimientos pueden ser controlados con un control electrónico dedicado y mecanismos de ajuste de velocidad.

HELICES: El objetivo de una buena hélice es generar suficiente impulso mediante su giro moviendo el aire, la cantidad de hélices es dependiendo del tipo del drone de manera que el tamaño y el grado de inclinación va determinado la cantidad de empuje necesaria para poder elevar el drone.

Para ello en la selección de una hélice, se debe tener en cuenta que debe tener acorde con el motor y variadores. Así afectando el peso, la aerodinámica y el perfil que tenga.

Figura 15 DRONE Juguete

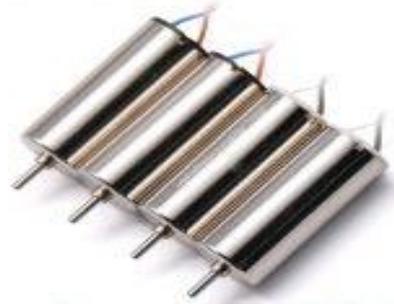


Figura 16 DRONE Profesionales



Figura 17 Hélice de drone



PLACA CONTROLADORA DE VUELO:

Es la encargada de enviar las señales a todos los sistemas de manera que funciona de acuerdo a las programaciones e instrucciones dadas por el operador del dron, generando la recepción de las órdenes para que se mantenga en vuelo por lo general cuentan en su gran mayoría con:

- Acelerómetro.
- Giróscopo.
- Magnetómetro.
- Sensor Barométrico
- GPS.
- Un procesador.

Por lo que la combinación de esos componentes permite tomar las mejores decisiones para obtener mejor vuelo.

SENSORES: Los sensores que contiene los drones permiten que posteriormente de ser analizada la programación se ejecuten para que realicen la misión deseada, de manera que se encuentran dos tipos de sensores activos y otros pasivos.

1. Sensor Activo: son utilizados principalmente para levantamientos topográficos, y por su volumen y tamaño son usados para fines comerciales.
2. Sensor Pasivo: Son aquellos que reflejan la radiación emitida desde el objeto, como ejemplo de estos sensores pasivos se pueden mencionar las cámaras fotográficas, video cámaras, cámaras infrarrojas, y cámaras térmicas.

Figura 18 Controladora de vuelo Pixhawk



Figura 19 Sensor de ultrasonido.



BATERIA: Generalmente estas baterías de dron son de li-po, la cual ellas permiten mantener en vuelo al dron y muchas de ellas son recargables. Estas baterías dependen de la cantidad de celdas que requiera el dron (según la cantidad de voltaje), también de acuerdo a la capacidad que se requiera por lo que se mide la potencia que puede almacenar en su interior es decir en miliamperios y finalmente se tiene la tasa de descarga la cual representa la cantidad con la que se va liberar el su voltaje por lo que entre más alta sea la tasa de descarga va ser mejor ya que va tener mayores resultados la batería.

Figura 20 Batería de Lito-Polímero



2.3.6. Especificaciones técnicas

Las siguientes especificaciones son drones comerciales los cuales cumplen diferentes misiones. Lo anterior con el fin de observar las características principales como la potencia, velocidad en los diferentes modos de vuelo y tiempo de vuelo, el peso y costos.

Tabla 10 Especificaciones de Drones Comerciales.

REFERENCIA / TIPO	PESO Kg	MAXIMO PESO DE DESPEGUE KG	MAXIMA VELOCIDAD m/s	MAX. VELOCIDAD DE ASCENSO m/s	VELOCIDAD MAXIMA DESCENSO m/s	TIEMPO DE VUELO min.	BATERIA No. Celdas / mAh	VOLTAJE v	TEMPERATURA OPERACIÓN ° C	COSTO USD	ALCANCE Km
INSPIRE I CUATRICOPTER	2,845	3,4	22	5	4	18	2S - 6000	22.8 V	(-10°~40°)	3.199	2
PHAMTON II CUATRICOPTER	1	1,5	13	6	2	25	3S - 5200	11.1 V	(-10°~50°)	1.500	1
MAVIC PRO CUATRICOPTER	0,743	0,74	18	5	3	27	3S - 2970	11.4 V	(0°~40°)	1.200	7
MATRICES 600 HEXACOPTER	9,5	15.1	18	5	3	18	6S - 5700	22.8 V	(-10°~40°)	4.700	5
DJI S900 HEXACOPTER	3,3	8,2	22	6	6	24	6S - 15000	22.8 V	(-10°~40°)	2.100	5
TAROT 680 HEXACOPTER	2,76	4.2	16,6	10	6	17	6S- 15000	14.8 V	(-10°~40°)	1.600	3,2
AGRAS MG OCTACOPTERO	10	15.1	11,1	8	7	24	2S- 9000	17.4 V	(0°~40°)	12.300	3
SPREADING S1000 OCTACOPTERO	4,3	11	19,4	5	4	40	6S - 20000	22.8 V	(10°~40°)	4.100	5
TAROT T18 OCTACOPTERO	11	10	16,6	6	5	35	6S - 20000	18 v	(10°~40°C)	4.500	3,2

Fuente: Autoría propia

2.4. FUNDAMENTOS TEORICOS

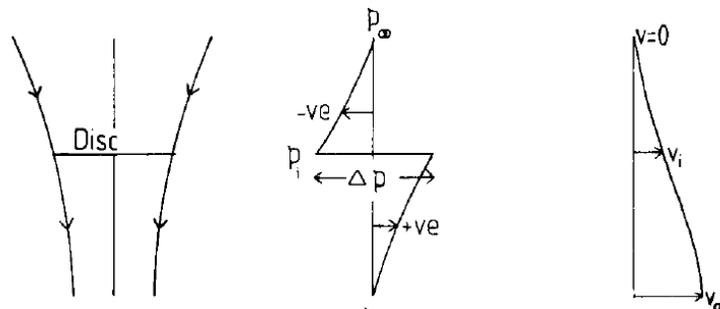
Para verificar los próximos capítulos es importante tener claro a que teoría de la aerodinámica nos debemos referenciar al realizar los correspondientes cálculos de los drones y esto se encuentra contemplado en los diferentes autores que han realizado los estudios para el diseño de helicóptero. Como veremos la aerodinámica de los drones se comporta similar a la de un drone, con excepción de su rotor de cola, el rotor principal y los estudios aerodinámicos realizados donde se puede observar cómo se comporta el flujo a través del este disco y que fuerzas genera para la sustentación, son algunas de las que veremos para ir profundizando en nuestro conocimiento aerodinámico del drone.

2.4.1. Potencia según la Teoría de la Cantidad de Momento

Para el estudio de los motores de un drone y su comportamiento lo tomaremos como un disco, el cual produce una columna de aire hacia abajo si se observa de una forma unidimensional. Al estudiar la mecánica de Newton donde aplicamos las leyes de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía y la energía del proceso global.

De acuerdo a la teoría de impulso de helicópteros, el disco accionador, presenta un aumento repentino de presión, el cual se extiende uniformemente. Para vuelo estacionario se puede tomar la columna de aire como un tubo de corriente el cual se encuentra ubicado por encima y por debajo del disco, afuera de este disco no se generan fuerzas externas que interfiera

Figura 21 Disco de accionamiento para el rotor de vuelo estacionario.



Fuente: SEDDON, John M.; NEWMAN, Simón. Basic helicopter aerodynamics. John Wiley & Sons, 2011.

De acuerdo al flujo de aire que se observa en la figura, el aire entra al disco, donde se presenta caída de la presión del aire que se encuentra sobre este, en el disco se presenta un incremento en la presión Δp , donde después de salir se presenta nuevamente una caída de la presión, llegando finalmente a una presión inicial o atmosférica.

De acuerdo a la figura la velocidad inicial en cero en el infinito aguas arriba la

cual va incrementando cuando llega al disco a una velocidad v_i , después de que atraviesa el disco sigue aumentando a un valor v_∞ , en el infinito aguas abajo. Es importante que la velocidad sea continua a través del tubo de corriente para no alterar la continuidad del flujo de masa.

De acuerdo a la conservación de energía expuesta por Bernoulli, se puede presentar por separado la aplicación de los dos flujos, antes y después del disco. Suponiendo que el flujo es incompresible, la entrada es:

$$p_\infty = p_i + \frac{1}{2} \rho v_i^2 \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad, y para el flujo de salida:

$$p_i + \Delta p + \frac{1}{2} \rho v_i^2 = p_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 \quad (2)$$

Deduciendo que

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 \quad (3)$$

Por conservación del momento, el empuje T en el disco es igual a la tasa global de aumento de movimiento axial del aire, es decir:

$$T = \rho A v_i v_\infty \quad (4)$$

Dónde:

A es el área del disco, por lo tanto, $\rho A v_i$ es el flujo masa a través de él. Puesto que Δp que es el empuje por unidad de área en el disco, se tiene:

$$p = \frac{T}{A} = \rho v_i v_\infty \quad (5)$$

De las dos expresiones para Δp se considera que:

$$v_\infty = 2v_i \quad (6)$$

O si se conoce el empuje

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} = \sqrt{\frac{w}{2\rho}} \quad (7)$$

Donde $w = T/A$ es llamada la carga del disco, v_i es la velocidad inducida, o alternativamente el flujo descendente.

El trabajo realizado sobre el aire representa por su cambio en la energía cinética por unidad de tiempo, es $\frac{1}{2} (\rho A v_i) v_\infty^2$ esto se conoce como la potencia inducida del rotor y se escribe como:

$$P_i = T v_i = \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\rho A}} \quad (8)$$

2.4.1.1. Potencia ideal y potencia real.

Para la teoría de movimiento predice que la potencia ideal es nula P_{di} , podríamos suponer que la tracción que se genera es nula $T=0$, y la potencia del rotor será la suma de la potencia inducida más la potencia parasita. Ahora si observamos cómo se halla la potencia ideal la cual se encuentra dada por la tracción entre la suma de la velocidad inducida y la velocidad de ascenso, se puede separar esta y obtener la siguiente formula:

$$P_r = P_i + P_z + P_0 \quad (9)$$

Donde

- P_r = potencia del rotor
- P_i = potencia inducida
- P_z = potencia al ascender
- P_0 = potencia parasita

Sin embargo, la teoría de cantidad de movimiento predice valores menores a los reales a medida que aumenta la tracción, debido a lo planteado en las hipótesis de la velocidad inducida, la estela del motor, entre otras. Por ello la potencia inducida incluye una corrección con respecto a la potencia ideal:

$$P_i = k * T v_i \qquad P_z = T v_z \quad (10)$$

Donde k es el coeficiente de corrección de potencia inducida $K > 1$, aproximadamente $k = 1,15$. También puede acercarse a partir del coeficiente de pérdida en la punta de la pala

$$k \approx \frac{1}{B}$$

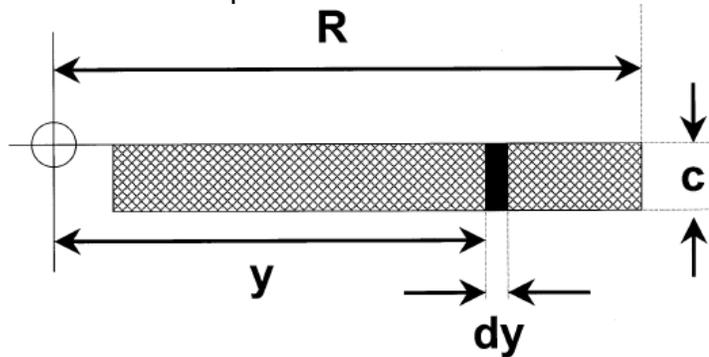
Se define la figura de mérito FM como la relación de potencia ideal y la potencia real a punto fijo

$$FM = \frac{P_{ido}}{P_{io} + P_0} \quad (11)$$

2.4.2. Teoría del Elemento de la Pala en una Hélice

La teoría de elemento se basa en realizar del proceso estándar de la teoría de perfil aerodinámico a la cuchilla giratoria. Aunque en realidad la hélice es flexible. Se asume como un cuerpo rígido debido a que la fuerza centrífuga hacia el exterior es la mayor fuerza que se ejerce, siendo esta suficiente para sostener la pala en forma rígida. Como se muestra en la Figura 22 se toma una tira típica de valor dy con el fin de mostrar su comportamiento en vuelo vertical y vuelo estacionario.

Figura 22 Coordenadas de la pala



Tanto en vuelo vertical como en vuelo estacionario la principal complicación es la necesidad de integrar las fuerzas elementales a lo largo del tramo del perfil al contrarrestar esto se produce una simplificación útil porque los ángulos de incidencia y los ángulos de flujo son normalmente pequeños para permitir que se realicen aproximaciones de ángulos pequeños.

En la *Figura 23* la rotación de las hojas se realiza en sentido contrario a las manecillas del reloj con velocidad angular Ω , el radio de la cuchilla tiene radio R , por lo tanto, la velocidad de la punta será ΩR escrito alternativamente como V_t una cuchilla elemental de la sección se toma en el radio y , de la longitud de la cuerda C y el ancho en el sentido de los diámetros. Las fuerzas en la cuchilla se muestran en la *Figura 23*. El flujo visto por la sección tiene componentes Ωy en el plano del disco y $(v_i + V_c)$ perpendicular a esta.

El resultado es:

$$U = \sqrt{(v_i + V_c)^2 + (\Omega y)^2} \quad (12)$$

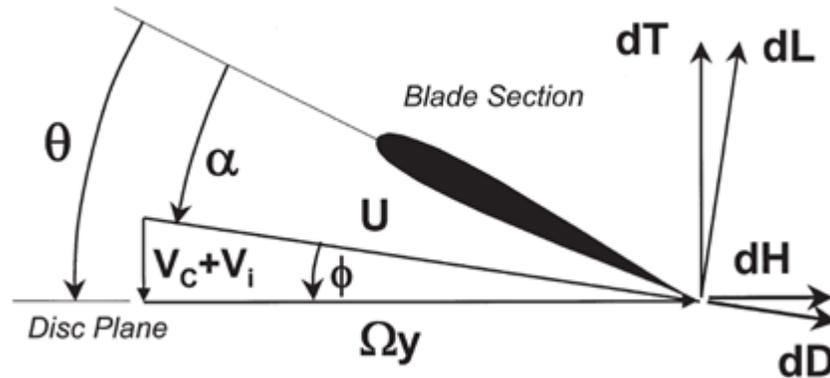
Velocidad tangencial

$$U_T = \Omega R \quad (13)$$

Velocidad total en el flujo

$$U_P = V_c + v \quad (14)$$

Figura 23 Condiciones de la sección de la cuchilla en vuelo vertical.



Donde

$$dH = \frac{dQ}{y} \quad (15)$$

Angulo de ataque

$$\alpha = \theta - \phi = \theta - \tan^{-1} \frac{V_c + v}{\Omega r} \quad (16)$$

Para encontrar el factor de solidificación el cual consta de la cuerda de la hélice, se encuentra dado por

$$\sigma = \frac{\text{area de la pala}}{\text{area del disco}} = \frac{NcR}{\pi R^2} = \frac{Nc}{\pi R} \quad (17)$$

Para hallar el coeficiente de tracción podemos utilizar la siguiente formula

$$C_T = \frac{4mg}{\rho \pi D^2 (\omega R)^2} \quad (18)$$

De lo anterior se debe hallar el coeficiente de potencia inducida:

$$C_{P_{i0}} = \frac{C_T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2}} \quad (19)$$

Determinamos el coeficiente de potencia parasita

$$\theta_o = \frac{6C_T}{\sigma C_L} + \frac{3}{2} \sqrt{\frac{C_T}{2}} \quad (20)$$

Con el coeficiente de velocidad inducida se puede obtener el coeficiente de potencia inducida.

$$C_{P_i} = \lambda_i * C_T \quad (21)$$

Hallamos el coeficiente de velocidad inducida

$$\lambda_{i0} = \frac{v_{i0}}{\omega R} \quad (22)$$

Conociendo el coeficiente de potencia parasita, se utiliza la siguiente ecuación.

$$C_{P0} = \frac{\sigma \delta_0}{8} \left[1 + \frac{\delta_2}{\delta_0} \left(\theta_0^2 - \frac{8}{3} \lambda_{i0} \theta_0 + 2 \lambda_{i0}^2 \right) \right] \quad (23)$$

Realizando los anteriores cálculos podemos determinar la potencia inducida para vuelo a punto fijo

$$P_{i0} = (C_{Pi} + C_{P0}) \rho \pi * \frac{D^2}{4} \omega^3 R^3 \quad (24)$$

2.4.3. Fundamento Estructural

Para tener en cuenta la estructura del dron, es importante la selección de la configuración. En este caso sabemos que el dron seleccionado es un hexacoptero debido a las facilidades que genera su transporte como, las ventajas de estabilidad al momento de realizar la misión. Para ello es importante la selección de los materiales para los cuales verificara rápidamente con el fin de determinar el óptimo.

Materiales

Aluminio: material no férreo el cual es muy útil en el uso de ingeniería por su baja densidad (2,7 g/cm³) y alta resistencia mecánica, según la aleación puede llegar a los 690 MPa resistente a la corrosión, buen conductor de la electricidad y el calor.

Poliestireno extrusionado: espuma rígida resultado de la extrusión del poliestireno en presencia de un gas espumante. Su principal propiedad es su baja densidad (0.033 g/cm³), aunque contiene una baja resistencia. Capaz de absorber golpes otorgados por el peso.

PLA: Plástico biodegradable derivado de recursos renovables. Tiene propiedades de baja densidad (1,25 g/cm³) y resistencia mecánica de 65 MPa. Se utiliza para impresoras en 3D permitiendo crear piezas complejas.

Fibra de Vidrio: Es un material que consta de fibras numerosas y extremadamente finas de vidrio. Tiene una densidad alta de (2,58 g/cm³). Tiene resistencia longitudinal de 1.080 MPa, pero una transversal de 50 MPa.²³

Fibra de carbono: fibra constituida por filamentos de 5 – 10 µm de diámetro y compuesto principalmente por carbono, tiene propiedades iguales al acero,

²³ MOYANO DÍAZ, Sergio. *Diseño y Construcción de un Quadcopter*. 2014. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya.

con resistencia longitudinal sobre los 1100 MPa, sobre los 50 MPa, y además tiene una baja densidad de (1,6 g/cm³). Gran aislante térmico, conductor de electricidad, resistente a cambios de temperatura y agentes externos.

2.4.3.1 Deformación, esfuerzos y teoría de vigas

Para determinar los materiales adecuados para aplicar en el diseño de cualquier elemento, se debe tener en cuenta las características de resistencia y rigidez. Cuando se aplica una fuerza F a lo largo de una barra, depende no solo de su material sino de su área transversal, de tal manera que mientras sea mayor la sección transversal, mayor será su resistencia. Para este caso se denomina esfuerzo axial o normal, el cual se encuentra definido mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

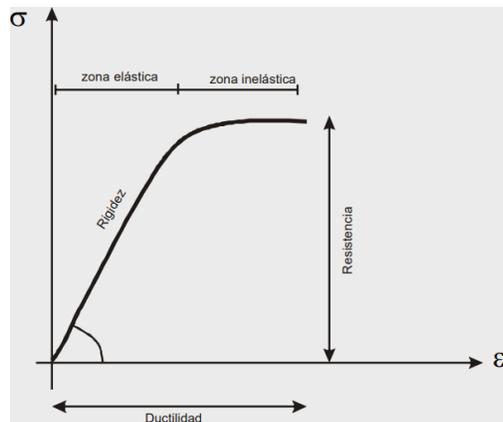
Siendo: F: Fuerza Axial
A: Sección Transversal.

Utilizando la Ley de Hooke la cual toma los esfuerzos e incrementándolos se puede presentar una relación de los esfuerzos y la deformación donde se obtiene la siguiente formula:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Siendo E el valor característico del material conocido comúnmente como módulo de Young del material y nos dice la rigidez del mismo.

Figura 24 Propiedad mecánica de los materiales



A partir de la ley de Hooke se puede calcular la deformación total de un elemento sometido a una Fuerzas Axial así:

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\frac{P}{A} = E \frac{\delta}{L}$$

$$\delta = \frac{PL}{AE}$$

Para hallar el momento flector tomamos un tramo libre de la viga de longitud dz

$$\sigma = \frac{Ey}{\rho}$$

Al integrar obtenemos:

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

La anterior formula es de flexión, donde I es el momento de inercia del área.

Deformación en el extremo de una viga: Para determinar la deformación en el extremo de una viga tenemos la siguiente ecuación:

$$EIy'' = M$$

Para poder integrar necesitamos realizar un corte x cerca del empotramiento A con el fin de hallar la ecuación del momento flector.

$$\sum M \quad M + PL - Px = 0$$

Figura 25 Deformación en extremo de la viga.

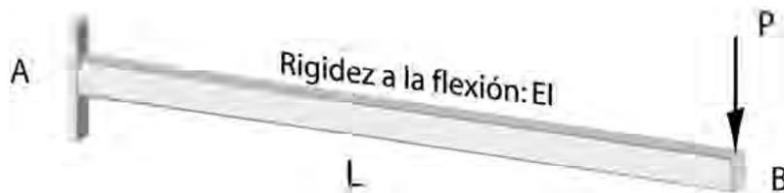
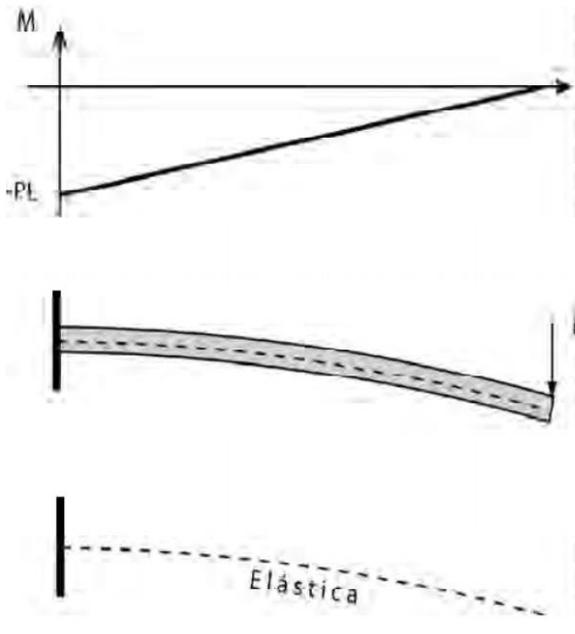


Figura 26 Grafica de esfuerzos sobre viga



Ecuación del momento

$$Mx = Px - PL$$

Por lo tanto:

$$Ely'' = Px - PL$$

Integrando una vez:

$$Ely' = \frac{Px^2}{2} - PLx + C_1$$

Integrando otra vez (doble integración):

$$Ely = \frac{Px^3}{6} - \frac{PLx^2}{2} + C_1x + C_2$$

Condiciones iniciales

$$x=0 \quad y=0$$

$$x=0 \quad y'=0$$

$$x = 0 \quad y = 0 \quad \begin{matrix} \nearrow \circ & \nearrow \circ & \nearrow \circ & \nearrow \circ \\ Ely = \frac{Px^3}{6} - \frac{PLx}{2} + C_1x + C_2 \end{matrix} \quad \text{por tanto } C_2 = 0$$

$$x = 0 \quad y' = 0 \quad \begin{matrix} \nearrow \circ & \nearrow \circ & \nearrow \circ & \nearrow \circ \\ Ely' = \frac{Px^2}{2} - PLx + C_1 \end{matrix} \quad \text{por tanto } C_1 = 0$$

Ecuación de la elasticidad:

$$Ely = \frac{Px^3}{6} - \frac{PLx}{2} \quad y = \frac{1}{EI} \left(\frac{Px^3}{6} - \frac{PLx^2}{2} \right)$$

Ecuación de la Pendiente

$$Ely' = \frac{Px^2}{2} - PLx \quad y = \frac{1}{EI} \left(\frac{Px^3}{6} - PLx \right)$$

Cálculo de la deformación en el extremo B

$$\delta_B = y(L)$$

$$\delta_B = \frac{1}{EI} \left(\frac{PL^3}{6} - \frac{PL^3}{2} \right)$$

$$\delta_B = \frac{PL^3}{3EI}$$

Cálculo de la pendiente en la viga:

$$y' = \frac{1}{EI} \left(\frac{Px^2}{2} - PLx \right)$$

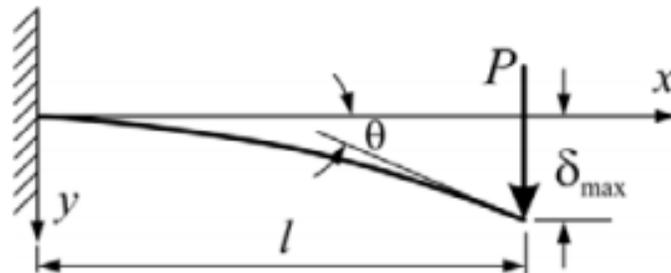
$$\theta_B = \frac{1}{EI} \left(\frac{PL^2}{2} - PL^2 \right)$$

$$\theta_B = \frac{PL^2}{2EI}$$

Para verificar la máxima deflexión lo podremos realizar mediante la siguiente formula:

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{3EI}$$

Figura 27 Diagrama de Esfuerzo Máximo en viga



2.5. MARCO LEGAL

En Colombia se han establecido leyes que regulan y dictan medidas sobre las minas antipersonales y artefactos de guerra tales como el Tratado de Otawa el 3 de marzo de 1997 el cual especifica la prohibición, empleo, almacenamiento, producción y transferencia de minas antipersonal y su destrucción, ratificado con la Ley 544 de 2000 y la Ley 759 del 2002.

Tabla 11 Marco legal.

Tratado Ottawa	Colombia se compromete a la prohibición total del desarrollo, producción, almacenamiento, transferencia y empleo de minas antipersonal, y en el que se exige su destrucción en todo el territorio colombiano.
Ley 544 de 2000	Por medio de la cual se aprueba la "Convención sobre la prohibición del empleo, almacenamiento, producción y transferencia de minas antipersonal y sobre su destrucción", hecha en Oslo el dieciocho (18) de septiembre de mil novecientos noventa y siete (1997).
Ley 759 del 2002	Por medio de la cual se dictan normas para dar cumplimiento a la Convención sobre la Prohibición del Empleo, Almacenamiento, Producción y Transferencia de minas antipersonal y sobre su destrucción y se fijan disposiciones con el fin de erradicar en Colombia el uso de las minas antipersonal.
Ley 1421 del 2010	Por medio de la cual se prorroga la ley 418 de 1997, prorrogada y modificada por las leyes 548 de 1999, 782 de 2002 y 1106 de 2006.
Ley 1448 del 2011	Por la cual se dictan medidas de atención, asistencia y reparación integral a las víctimas del conflicto armado interno y se dictan otras disposiciones.
CONPES 3567	(Política Nacional de Acción contra Minas Antipersonal 2009 – 2019).
Circular 328 AN/190	Sistemas de aeronaves no tripuladas donde se proporciona un marco normativo internacional fundamental mediante normas y métodos recomendados SARPS, con el apoyo de procedimientos para los servicios de navegación aérea PANS y textos de orientación a efectos de afianzar la operación normal de los UAS en el mundo de acuerdo con las operaciones tripuladas.
RAC 4,	Normar de aeronavegabilidad y operaciones de aeronaves, artículo 4.25.8.2 otras disposiciones, donde establece los permisos especiales para la operación de equipos de vuelo no tripulados.
Circular reglamentaria No. 002	Requisitos generales de aeronavegabilidad y operaciones para RPAS en Colombia.

3. CAPITULO: METODOLOGIA APLICADA

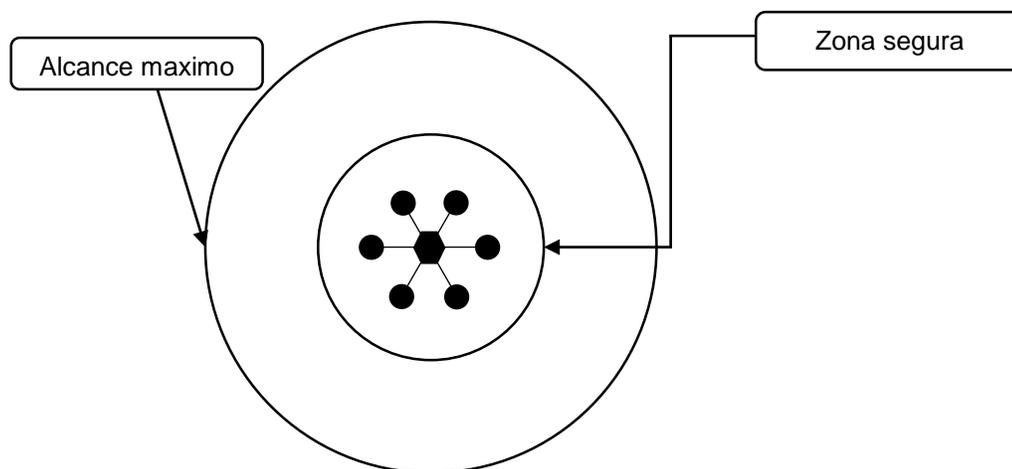
3.1. DISEÑO PRELIMINAR

Durante esta etapa se desea conocer todos los requisitos que puede tener el usuario al efectuar la interacción con el dron e iniciar la misión de búsqueda de minas antipersonales; que necesidades son las que se deben suplir, cuáles son los riesgos que puede presentar la aeronave en la misión, que consideraciones en programación y a nivel de ingeniería se deben tener en cuenta con el fin de satisfacer los requisitos y poder cumplir con los diferentes objetivos de la misión.

3.1.1. Misión

La misión principal del dron es realizar la detección de minas antipersonales y su posterior destrucción. Para efectuar la búsqueda se debe establecer la posición inicial teniendo en cuenta que debe encontrarse a una distancia segura. De acuerdo al anexo A, la mina claymore tiene un alcance de 250 metros siendo esta una mina de fragmentación²⁴. Utilizaremos un factor de seguridad de 4 para todo el proyecto, el cual se establece que el operador debe encontrarse a una distancia mínima de 1 km con el fin de evitar que cualquier fragmento cause algún daño. Después de esto es importante establecer el alcance que puede tener el dron, el cual depende de la emisora R/C se realizará donde el dron debe posteriormente iniciar la misión después de recorrer esta distancia.

Figura 28 Zona establecidas para la misión-



De igual manera es importante establecer donde se realizará la priorización de las

²⁴ ALONSO OLLACARIZQUETA, L. (1995). Enemigos invisibles, campos de muerte. Las minas antipersonal. Seminario de Investigación para la Paz, Centro de Investigación para la Paz.

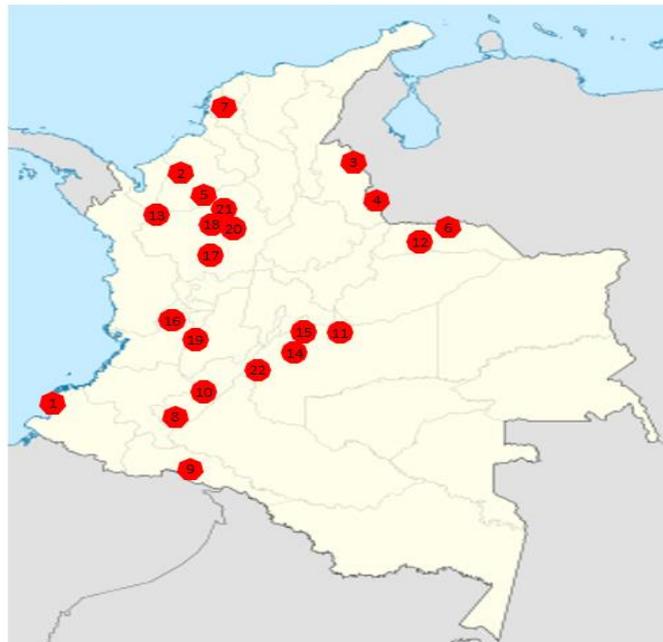
zonas para el desminado.

Figura 29 Priorización de Víctimas



Como observamos en la Figura 29 actualmente se encuentran 22 zonas donde se han presentado un alto número de heridos, por lo tanto se efectuara los cálculos aerodinámicos en estos puntos con el fin de obtener la potencia que requiere el hexacoptero en estos puntos.

Figura 30 Ubicación zonas priorizadas.



3.1.2. Requisitos

Se establecieron los siguientes requisitos generales que debe cumplir el dron para efectuar la búsqueda de minas antipersonales.

Tabla 12 Requisitos para la misión

No.	Requisito	Parámetro
1	Altura del dron	Al momento de iniciar la misión el dron requiere alcanzar una altura que permita sobrepasar los obstáculos que se presenten.
2	Tiempo de Vuelo	el tiempo de vuelo debe ser adecuado para efectuar la operación mínima que se realizaría en la búsqueda de minas antipersonales.
3	Materiales	Se requiere materiales livianos y resistentes los cuales permitan un transporte sencillo a zonas de difícil acceso.
4	Mando y control	El mando se realizará a control remoto o controlado directamente mediante un programa que permita dar las instrucciones al dron para realizar la misión. para ello debe contar con la ubicación en tiempo real por medio de un GPS, Cámara y sensores que permitan la detección de obstáculos, con el fin de contar con una maniobrabilidad y seguridad del dron. En caso de pérdida de señal el dron deberá volver a su punto de origen.
5	Carga útil	Debe permitir la carga de los sensores, cámara, así como la del detector de minas.
6	Maniobrabilidad	Poseer movimientos de Roll, Pitch, Yaw y elevación vertical. De igual manera se requiere que el dron corrija las variaciones o cambios de vectores de viento durante la misión con el fin de que no afecte la misión.
7	Velocidad de operación	La velocidad de operación debe iniciar con una velocidad promedio que permita llegar a un tiempo corto a la zona de detección, para después disminuirla a una velocidad que permita la correcta operación del detector de metales.
8	Alcance	De acuerdo a lo establecido en la misión, el alcance del dron debe permitir una operación después de la zona segura.

Fuente: Autoría propia.

De acuerdo con los anteriores requisitos establecidos para la misión a desempeñar, se efectuará el análisis para realizar el diseño del DRONE realizando análisis de empuje, peso, carga útil y demás componentes que

debe tener para cumplir a cabalidad la misión.

3.1.3. Selección de la configuración del Drone

Para efectuar la configuración de nuestro dron y de acuerdo a las necesidades de la misión, es importante realizar una selección a lo que existe actualmente en el mercado teniendo en cuenta las configuraciones que se encuentran establecidas, así como sus componentes, motores que se utilizarán, el tipo de hélices, los variadores, telemetría, baterías y estructura.

Para establecer una configuración adecuada debemos saber inicialmente cuantos motores necesitaremos para realizar la misión y poder efectuar la detección sin presentar fallas durante la misma. En la Tabla 10; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar las velocidades con las que operan estos drones, así como las velocidades de operación. A continuación, se realizará un análisis de los parámetros más viable para el proyecto de acuerdo a la misión.

Parámetros: se establecerá un valor de 1 a 3 siendo el 1 más bajo y el 3 más alto de cumplimiento del requisito, teniendo en cuenta que hay requisitos que tienen un valor de peso mayor ya que dependeremos de este parámetro durante todo el proyecto.

Tabla 13 validación de la configuración del dron.

REFERENCIA	TIPO	PESO DE DESPEGUE Kg	TIEMPO DE VUELO	ALCANCE	COSTO	TOTAL
INSPIRE I	CUATRICOPTER	1	2	1	1	5
		12%	23%	5%	5%	45%
PHAMTON II	CUATRICOPTER	3	1	1	1	6
		35%	12%	5%	12%	63%
MAVIC PRO	CUATRICOPTER	3	1	3	1	8
		35%	12%	15%	12%	73%
MATRICES 600	HEXACOPTER	3	1	3	1	8
		35%	12%	15%	12%	73%
DJI S900	HEXACOPTER	3	3	2	1	9
		35%	35%	10%	12%	92%
TAROT 680	HEXACOPTER	2	2	2	2	8
		23%	23%	10%	23%	80%
AGRAS MG	OCTACOPTERO	1	1	3	2	7
		12%	12%	15%	10%	48%
SPREADING S1000	OCTACOPTERO	3	2	2	3	10
		35%	23%	10%		68%
TAROT T18	OCTACOPTERO	1	2	3	1	7
		12%	23%	15%	5%	55%

Como podemos observar el hexacoptero es la mejor opción para la selección de la configuración de acuerdo a los parámetros que establecimos. Tomaremos las referencias del diseño del hexacoptero como base para construir todo el diseño del proyecto

3.1.4. Componentes para el diseño.

Es importante tener en cuenta los componentes que se requieren para el diseño del dron una vez determinada la configuración la cual es el hexacoptero.

Al verificar estos componentes establecemos cuales eran los elementos mínimos que debe tener el hexacoptero para su funcionamiento. Realizando un promedio de esta tabla podremos realizar los cálculos aerodinámicos con el fin de determinar la potencia necesaria para realizar la misión.

Los hexacopteros seleccionados, aunque varía los componentes que usa, su misión es similar a la que se requiere en la búsqueda de minas antipersonales, observando que se utilizan para fotografía, o realizar videos.

Los componentes adicionales que se quieren configurar se verificaran posteriormente.

Tabla 14 Componentes

COMPONENTE	CANTIDAD	Peso (Kg)
TREN ATERRIZAJE	1	0,875
HELICE	6	0,0194
MOTOR	6	0,3
ECS	6	0,0816
BATERIA	1	1,46
GPS	1	0,029
CONTROLADORA	1	0,224
PMU	1	0,027
DETECTOR METALES	1	2,5

Es importante tener en cuenta el alcance que requerimos para la misión, por lo que posteriormente se verificara la telemetría que se desea usar. Nuestro peso promedio para la configuración será de 5,18 kg, y tendremos en cuenta el peso que se requiere con el detector de metales el cual es de 2,5 kg para el detector de metales. Por consiguiente, tenemos un peso total de 7,68 kg para iniciar con nuestros cálculos matemáticos.

3.2. ESTUDIO AERODINÁMICO Y MECÁNICO

Para el estudio mecánico del drone se toma de referencia las características iniciales de los hexacopteros analizados en esta tesis, con el fin de verificar si los componentes que se encuentran acordes a la misión para la cual se requiere o si se debe optimizar algún componente.

Para efectuar los correspondientes cálculos del drone efectuaremos el modelo matemático de vuelo, y con esto tendremos los parámetros iniciales para el respectivo diseño. Es importante recordar que el UAV es una aeronave más pesada que el aire y para poder elevarse lo realiza a través de los motores eléctricos seleccionados y las hélices, los cuales dependiendo de la Fuerza que generan y el tamaño de las hélices, aplicara una fuerza opuesta a la realizada por la aeronave permitiendo generar y controlar los movimientos.

Se debe tener en cuenta que de acuerdo a los movimientos que pueden realizar la aeronave no tripulada para las operaciones de vuelo requeridas cumpliendo la misión establecida, se puede observar las siguientes:

- Vuelo a punto fijo.
- Vuelo vertical ascendente.
- Vuelo vertical descendente.
- Vuelo de avance.

De igual manera para el cálculo de la potencia requerida, se debe utilizar la teoría de cantidad de movimiento (TCM) y la teoría de Elemento de la Hélice (TEP) la cual ofrece resultados más acertados a la realidad.

Al realizar la comparación de las dos teorías, y de acuerdo a la potencia calculada, se podrá realizar comparación de los datos con el fin de obtener factores de corrección.

3.2.1. Cálculo de la potencia de acuerdo a la TCM

Es necesario tener en cuenta que, durante el vuelo a punto fijo, la velocidad del rotor respecto al aire es cero. Con lo anterior concluimos que la potencia requerida para un vuelo axial con velocidad de ascenso es nula.

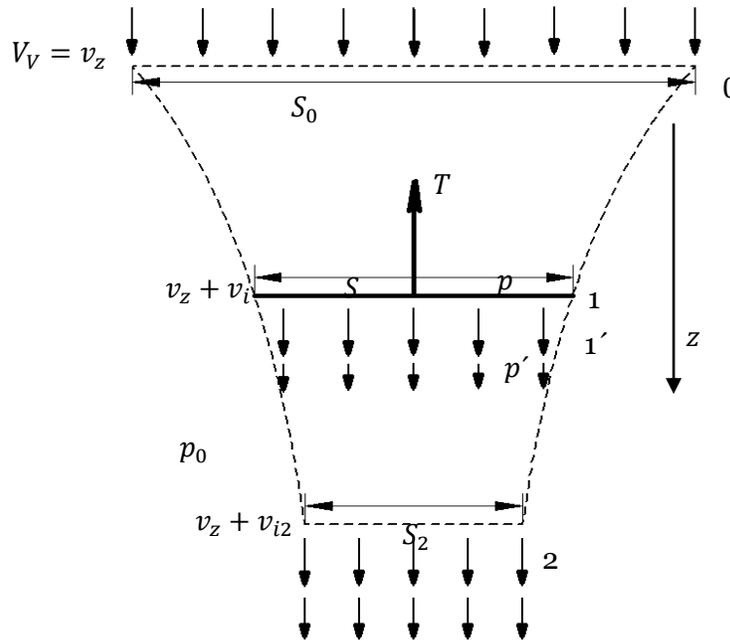
Se deben tener en cuenta unas consideraciones o hipótesis con el fin de cumplir con la TCM, las cuales son:

- El movimiento es estacionario.
- Es un proceso adiabático ya que no se presenta transferencia de calor.
- El movimiento es unidimensional y uniforme.
- La densidad es constante, debido a que es un fluido incompresible

- Los efectos de la viscosidad son despreciables.
- La velocidad aplicada en toda la pala es constante.

Ahora se debe definir un volumen de control con el fin de efectuar el análisis de la Fuerza que aplica la pala a este volumen. El volumen de control se encuentra aguas arriba y el fluido acelera a medida que el rotor acelera.

Figura 31 Volumen de control del fluido.



Fuente: ALEJANDRO Roger. Diseño de helicópteros y aeronaves diversas. España, ETSEIAT – UPC, 2011

Hay que tener en cuenta que, al momento de realizar los cálculos de potencia, se debe tener la densidad para efectuar nuestros cálculos y para ello es importante observar a que altura efectuaremos el trabajo para no dejar a parte este importante factor a la hora de realizar el cálculo de potencia.

Para efectuar el cálculo de la densidad a la altura que actualmente trabajaremos, utilizaremos el modelo ISA (Atmósfera Estándar Internacional), en los cuales encontraremos los valores de presión, temperatura, densidad, y viscosidad del aire en función de la altitud.

La ecuación es la siguiente:

$$\rho(h) = \rho_0 * \left(\frac{T_0 + \lambda * h}{T_0} \right)^{\frac{g}{R * \lambda} - 1}$$

Donde:

- ρ_0 : densidad a nivel del mar [kg/m^3].
- T_0 : Temperatura a nivel del mar [K].

- λ : gradiente térmico = $-6,5 \cdot 10^{-3}$ [K/m].
- h : Altitud a la que está siendo usado el dron. [m].
- R : Constante de los gases perfectos para el aire = 287 [J/kg*K].
- g : Gravedad a nivel del mar $9,81$ [m/s²].
- $\rho(h)$: Densidad a una altura h determinada.

Para la densidad donde puede operar el dron, se realizó el siguiente cuadro donde se presenta un alto número de víctimas, con el fin de determinar la densidad de cada uno de estos lugares con el fin de tener en cuenta para utilizarlo en cualquiera de estos escenarios.

Tabla 15 Densidad de ciudades con mayor número de víctimas

CIUDAD	DENSIDAD (Kg/m ³)	TEMPERATURA °c	Velocidad del Viento	Humedad %
ITUANGO	1,053	22	Viento del NE a 5 km/h	81
ANORÍ	1,054	19	Viento del NO a 5 km/h	84
PLANADAS	1,082	19	10 Km/h	78
VALDIVIA	1,101	28	Viento del N a 5 km/h	86
SAN CARLOS	1,112	24	viento del E a 6 km/h	67
CHAPARRAL	1,128			
URIBE	1,130	20	viento del N a 5 km/h	89%
MESETAS	1,131	21	viento del O a 5 km/h	85
DABEIBA	1,173	24	viento del NO a 3 km/h	90
TAME	1,185	24	3 km/h	85
VISTAHERMOSA	1,190	23	viento del O a 6 km/h	85
PUERTO RICO	1,190	23	viento del SO a 8 km/h	85
SAN VICENTE DEL CAGUÁN	1,192	20	6 km/h	88
PUERTO ASÍS	1,196	19	viento del O a 10 km/h	92
MONTAÑITA	1,198	19	viento del NO a 8 km/h	90
EL CARMEN DE BOLÍVAR	1,202	27	viento del NO a 5 km/h	79
ARAUQUITA	1,206	25	viento del O a 3 km/h	84
TARAZÁ	1,210	28	viento del O a 3 km/h	90

CIUDAD	DENSIDAD (Kg/m ³)	TEMPERATURA °c	Velocidad del Viento	Humedad %
TIBÚ	1,216	24	viento del SO a 3 km/h	90
TEORAMA	1,217	24	viento del SO a 3 km/h	90
TIERRALTA	1,219	24	viento del SO a 3 km/h	93

3.2.1.1. Potencia en vuelo a punto fijo

Para la potencia de vuelo a punto fijo, se establece que la velocidad relativa del rotor respecto al aire es cero. De igual manera determinamos que la tracción que se debe generar en el hexacoptero es igual al peso total de este, el cual se cuenta todos sus componentes, estructura, baterías y el detector de metales. La suma total para el DJI S900 es de 5,18 kg. El detector pesa unos 2,5 kg, teniendo un peso total de 7,68 kg aproximadamente. El hexacoptero cuenta con 6 motores donde se realiza la distribución del peso total el cual es de 1,28 kg para que se genere la sustentación, determinando que cada motor debe generar una fuerza equivalente a 12,544N para generar la igualdad de la sumatoria de Fuerzas y la estabilidad requerida.

Para que los motores trabajen de manera continua es necesario aplicar un factor de seguridad mirando la relación empuje peso la cual debe ser mínimo 4, para que el motor trabaje al 25% de su potencia máxima. Lo que concluimos que la Fuerza en cada motor debe ser 50,176N.

Para la teoría de movimiento continuo, conociendo que la velocidad en z es nula y renombrando la velocidad inducida como v_{i0} para el caso de vuelo en punto fijo, se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_{id} = T * v_{i0}$$

Donde:

- P_{id} = Potencia requerida para vuelo a punto fijo
- T = tracción que genera cada motor (50,176N)
- v_{i0} = Velocidad de vuelo a punto fijo.

Para conocer la velocidad de vuelo a punto fijo podemos realizar el siguiente cálculo

$$v_{i0} = \sqrt{\frac{T}{2\rho S}}$$

Donde:

- $S_2 = \text{área proyección del rotor.}$

Para determinar el área de proyección del rotor, se tiene en cuenta que el rotor cuando gira forma un círculo de radio R. de acuerdo a lo que actualmente verificamos en el mercado se utilizaran los motores 4114, los cuales cuentan con una hélice de 15x5,2" lo cual en centímetros es 38,1 cm. La siguiente ecuación nos permitirá calcular su área:

$$S = \pi R^2$$

Por lo tanto, el área tiene un valor de:

$$S = \pi * \left(\frac{0,381}{2}\right)^2 = 0,1140 \text{ m}^2$$

Desarrollando la ecuación obtendremos el siguiente resultado

$$v_{i0} = \sqrt{\frac{50,176}{2 * 1,225 * 0,1140}} = 13,403 \frac{m}{s}$$

Conociendo el valor de la velocidad inducida, se podrá efectuar el cálculo de la potencia requerida a punto fijo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_{id} = T * v_{i0}$$

$$P_{id} = 50,176 * 13,403 = 672,509 \text{ W}$$

De acuerdo a lo anterior se puede verificar como la potencia del drone varía de acuerdo a la altitud que trabaje el drone. Para este ejercicio se verificará la potencia de acuerdo a los diferentes sitios donde se puede realizar el desminado en Colombia.

Tabla 16 Potencia inducida en vuelo a punto fijo

CIUDAD	altitud (m)	DENSIDAD (Kg/m ³)	Potencia TMC (W)
ITUANGO	1.55	1,05	725,47
ANORÍ	1.53	1,05	724,93
PLANADAS	1.27	1,08	715,75
VALDIVIA	1.10	1,10	709,49
SAN CARLOS	1.00	1,11	706,00
CHAPARRAL	854	1,13	700,97
URIBE	835	1,13	700,31
MESETAS	827	1,13	700,04

CIUDAD	altitud (m)	DENSIDAD (Kg/m ³)	Potencia TMC (W)
DABEIBA	450	1,17	687,30
TAME	340	1,18	683,64
VISTAHERMOSA	301	1,19	682,35
PUERTO RICO	299	1,19	682,29
SAN VICENTE DEL CAGUÁN	280	1,19	681,66
PUERTO ASÍS	250	1,19	680,67
MONTAÑITA	235	1,19	680,18
EL CARMEN DE BOLÍVAR	197	1,20	678,93
ARAQUITA	165	1,20	677,89
TARAZÁ	125	1,21	676,58
TIBÚ	75	1,21	674,95
TEORAMA	72	1,21	674,86
TIERRALTA	51	1,21	674,18
TUMACO	2	1,22	672,59

3.2.1.2. Cálculo de la potencia requerida en vuelo axial ascendente

La velocidad de ascenso hace referencia a la velocidad que se desplaza verticalmente el hexacoptero. Según la TCM puede tener relación la velocidad inducida a punto fijo y la velocidad inducida en vuelo axial ascendente teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$\frac{v_i}{v_{i0}} = -\frac{1}{2} * \frac{v_z}{v_{i0}} + \sqrt{\frac{1}{4} * \left(\frac{v_z}{v_{i0}}\right)^2 + 1}$$

Se denota entonces que, para encontrar la potencia requerida, es necesario encontrar los valores de la velocidad inducida en vuelo axial ascendente y la velocidad inducida en vuelo a punto fijo. De igual manera depende de la altitud a la que se encuentra el drone. Por lo tanto, establecemos la altura estándar la cual será a nivel del mar con una densidad de 1.225 kg/m³.

Debemos tener en cuenta las especificaciones generales de los drones en el mercado para hexacoptero, donde se establece que la velocidad máxima para ascenso es de 6 m/s por consiguiente, se realiza el siguiente cálculo para determinar la velocidad inducida a una altura a nivel del mar.

$$\frac{v_i}{v_{i0}} = -\frac{1}{2} * \frac{6}{13,403} + \sqrt{\frac{1}{4} * \left(\frac{6}{13,403}\right)^2 + 1}$$

$$\frac{v_i}{v_{i0}} = 0,801$$

$$v_i = 0,801 * v_{i0}$$

$$v_i = 0,801 * 13,403$$

$$v_i = 10,73 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

También se puede calcular la potencia ideal requerida en función de la velocidad de ascenso, en la misma altura establecida para la operación del dron de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$P_i = T * (v_z + v_i)$$

$$P_i = 50,176 * (6 + 10.73)$$

$$P_i = 839,43 \text{ W}$$

A continuación, se relaciona en la *Tabla 17* la potencia en vuelo axial ascendente que tendrá el dron al realizar el procedimiento en cada municipio.

Tabla 17 Velocidad Ascendente en TMC

CIUDAD	Altitud (m)	Densidad (Kg/m ³)	Potencia en vuelo axial ascendente (W)
ITUANGO	1.550	1,053	891,45
ANORÍ	1.535	1,054	890,92
PLANADAS	1.278	1,082	881,93
VALDIVIA	1.100	1,101	875,81
SAN CARLOS	1.000	1,112	872,40
CHAPARRAL	854	1,128	867,47
URIBE	835	1,130	866,83
MESETAS	827	1,131	866,56
DABEIBA	450	1,173	854,11
TAME	340	1,185	850,55
VISTAHERMOSA	301	1,190	849,28
PUERTO RICO	299	1,190	849,22
SAN VICENTE DEL CAGUÁN	280	1,192	848,61
PUERTO ASÍS	250	1,196	847,65
MONTAÑITA	235	1,198	847,17
EL CARMEN DE BOLÍVAR	197	1,202	845,95

CIUDAD	Altitud (m)	Densidad (Kg/m ³)	Potencia en vuelo axial ascendente (W)
ARAUQUITA	165	1,206	844,95
TARAZÁ	125	1,210	843,65
TIBÚ	75	1,216	842,06
TEORAMA	72	1,217	841,97
TIERRALTA	51	1,219	841,30
TUMACO	2	1,225	839,76

3.2.1.3. Potencia de vuelo axial descendente

La teoría de cantidad de movimiento será válida mientras se cumpla la condición que la velocidad de ascenso sea el doble de la velocidad inducida. Se puede diferenciar dos casos:

- A velocidad de descenso moderada se requiere modelos empíricos debido a las complejas recirculaciones y a que el flujo se encuentra en régimen turbulento.
- A velocidad de descenso elevada la TCM ofrece resultados más aceptables ya que el flujo tiene una configuración bien definida hacia atrás.

Con el fin de iniciar el estudio y de acuerdo a las velocidades de descenso de los drones en el mercado actual se indica una velocidad de descenso de 3 m/s operando a la velocidad inducida que calculamos anteriormente de 13.403 m/s.

$$\frac{v_c}{v_{i0}} = -\frac{3 \frac{m}{s}}{13,403 \frac{m}{s}} = -0,2238$$

El régimen de trabajo es anillos de vórtice o turbillonarios.

Se aplica un factor de corrección dependiendo el valor obtenido de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\frac{v_i}{v_{i0}} = k - \frac{v_c}{v_{i0}} \quad \text{si } -1,5 \leq \frac{v_c}{v_{i0}} \leq 0$$

$$\frac{v_i}{v_{i0}} = k * \left(7 + 3 * \frac{v_c}{v_{i0}} \right) \quad \text{si } -2 \leq \frac{v_c}{v_{i0}} \leq -1,5$$

Donde k es el factor de corrección, 1 para hélices ideales y 1,15 para hélices reales.

A continuación, se halla la velocidad inducida, utilizando la anterior ecuación:

$$\frac{v_i}{v_{i0}} = k - \frac{v_c}{v_{i0}} \rightarrow v_i = v_{i0} * \left(k - \frac{v_c}{v_{i0}} \right) \rightarrow v_i = 13,403 * (1,15 - (-0,2238))$$

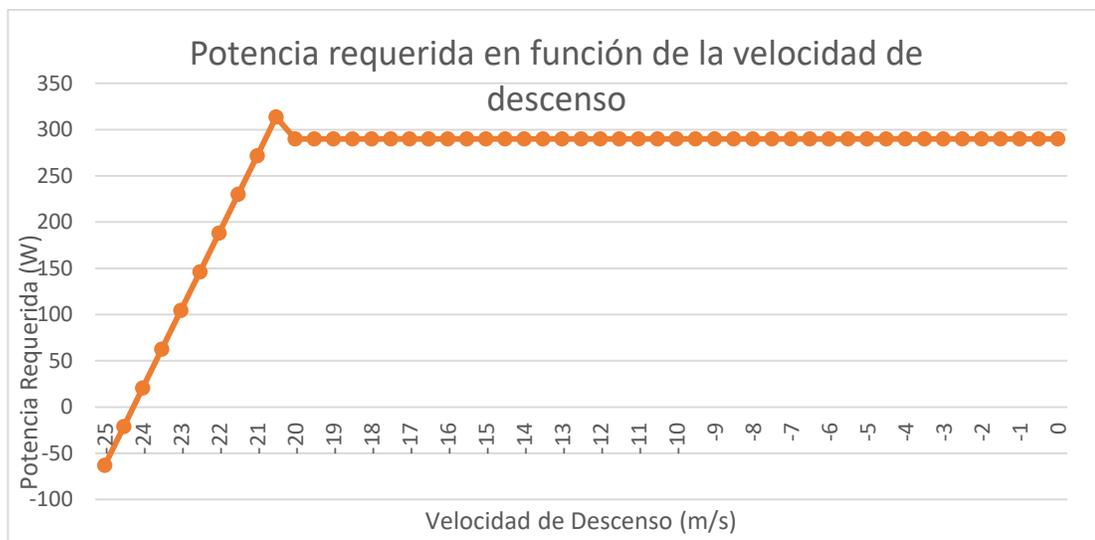
$$v_i = 18,825 \frac{m}{s}$$

A continuación, calculamos la potencia ideal

$$P_{id} = T * (v_i + v_c)$$

$$P_{id} = 50,176 * (18,825 - 3) = 201,538 W$$

Figura 32 Potencia requerida en función de la velocidad de descenso



Se observa en el gráfico que para velocidades mayores a 20 m/s disminuye la potencia y esta se mantiene dentro de este rango. El pico en el gráfico es debido al cambio de condición de acuerdo a los valores establecidos.

Teniendo en cuenta la gráfica, se tomará una velocidad máxima de 12 m/s en todas las ciudades establecidas teniendo en cuenta que en este cálculo no interviene la densidad del aire.

En la siguiente tabla podemos observar como la potencia de vuelo varía de acuerdo a la altura en los sitios donde se desea realizar el desminado

Tabla 18 Potencia en vuelo axial descendente.

CIUDAD	Relación $\left(\frac{v_c}{v_{i0}}\right)$	Velocidad inducida en descenso (m/s)	Potencia en vuelo axial Descendente (W)
ITUANGO	0,21	19,63	834,29
ANORÍ	0,21	19,61	833,67
PLANADAS	0,21	19,40	823,11
VALDIVIA	0,21	19,26	815,91
SAN CARLOS	0,21	19,18	811,91
CHAPARRAL	0,21	19,07	806,11
URIBE	0,21	19,05	805,36
MESETAS	0,22	19,04	805,05
DABEIBA	0,22	18,75	790,39
TAME	0,22	18,67	786,19
VISTAHERMOSA	0,22	18,64	784,71
PUERTO RICO	0,22	18,64	784,63
SAN VICENTE DEL CAGUÁN	0,22	18,62	783,91
PUERTO ASÍS	0,22	18,60	782,77
MONTAÑITA	0,22	18,59	782,21
EL CARMEN DE BOLÍVAR	0,22	18,56	780,77
ARAUQUITA	0,22	18,54	779,57
TARAZÁ	0,22	18,51	778,07
TIBÚ	0,22	18,47	776,20
TEORAMA	0,22	18,47	776,09
TIERRALTA	0,22	18,45	775,30
TUMACO	0,22	18,42	773,48

3.2.1.4. Potencia en vuelo de avance

Para calcular la velocidad en vuelo de avance se puede utilizar la teoría de cantidad de movimiento. Se realizan las mismas hipótesis, exceptuando el flujo de aire el cual pasa a ser bidimensional.

$$T = 2 * m * v_i \rightarrow T = 2 * \rho * S * v_i * \sqrt{v_x^2 + (v_z + v_i^2)}$$

$$P_{id} = T * (v_z + v_i) \rightarrow P_{id} = 2 * \rho * S * v_i * \sqrt{v_x^2 + (v_z + v_i^2)}$$

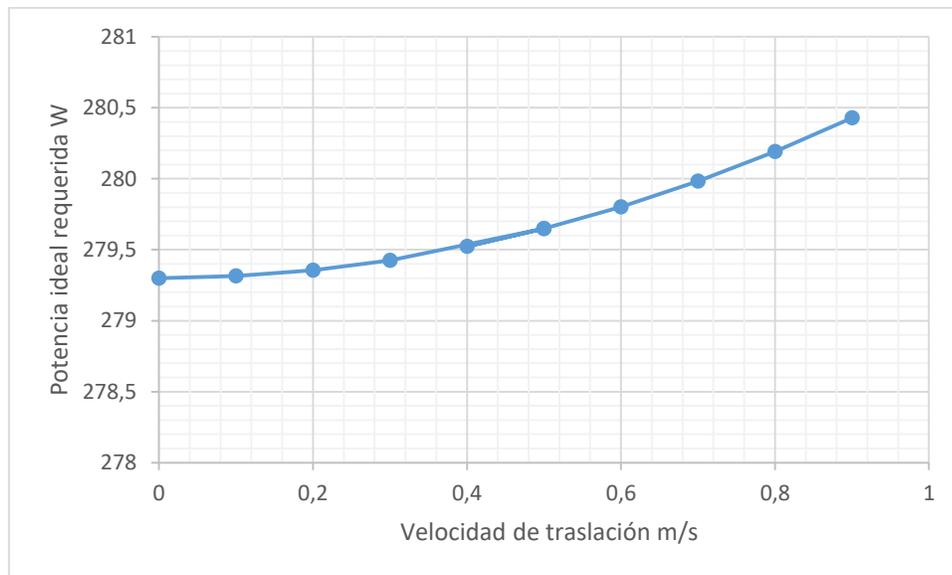
De acuerdo a las anteriores ecuaciones se puede realizar diferentes análisis graficando la velocidad de traslación vs la potencia con el fin de observar su comportamiento. Se debe tener en cuenta que la velocidad de ascenso V_z , debido a que se está trasladando horizontalmente, tendría a ser 0, por lo cual la componente vertical en su totalidad sería la velocidad inducida.

Para efectuar los estudios se remplazarán por valores acordes a los obtenidos en los ejercicios anteriores. Teniendo en cuenta que para la operación del detector debe estar a una velocidad muy mínima, entre 0 m/s a 1 m/s.

A continuación, se estudiará la variación de la velocidad de traslación fijando la velocidad inducida en el fluido por el rotor. Para ello es necesario establecer una velocidad inducida media a partir de las velocidades inducidas en otras condiciones de vuelo vistas. Por tal razón tomamos una velocidad inducida de 10 m/s.

Conociendo la densidad del fluido y la superficie perpendicular a la dirección del fluido S , son conocidas el valor de la potencia ideal en función de la velocidad de traslación.

Figura 33 Potencia ideal vs Velocidad de Traslación.



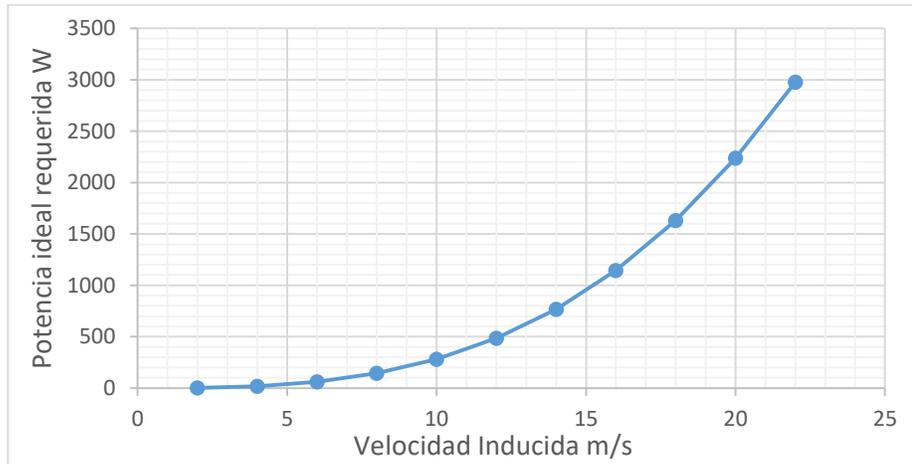
Como podemos observar la velocidad de traslación no representa mayores cambios de potencia debido a las bajas velocidades que maneja.

Por consiguiente, se realizará el análisis de dos casos para la variación de la velocidad inducida. Observando su comportamiento.

Caso 1. Velocidad de traslación a 1 m/s

Como se observa en la gráfica, el incremento de la velocidad inducida, aumenta considerablemente la potencia por el rotor al fluido, estableciendo un aumento exponencial.

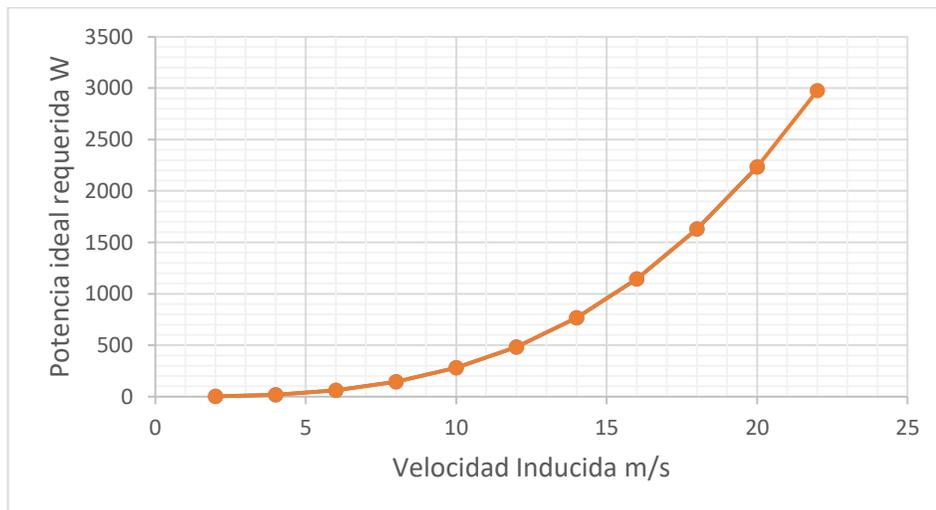
Figura 34 Potencia ideal en función de la velocidad inducida caso 1.



Caso 2 velocidad traslación a 0,5 m/2.

Como se observa en la figura, la potencia no varía respecto al cambio de velocidad de traslación debido a que su variación es muy pequeña, observando solo la variación que se presenta de potencia requerida frente a la velocidad inducida.

Figura 35 Potencia requerida vs velocidad inducida caso 2



A continuación, realizaremos el cálculo de potencia en los lugares que hemos tomado de referencia con el fin de conocer la potencia considerando una velocidad inducida de 10 m/s, despreciando la velocidad de ascenso V_z y asumiendo una velocidad de avance en todos los terrenos de 1 m/s se realiza la siguiente tabla para calcular la potencia de avance.

Tabla 19 Potencia Vuelo de avance

Ciudad	Densidad (ρ)	Área proyección del rotor S (m^2)	Velocidad Inducida V_i ($\frac{m}{s}$)	Velocidad de Avance V_x ($\frac{m}{s}$)	Potencia (W)
ITUANGO	1,05	0,114	10	1	241,22
ANORÍ	1,05	0,114	10	1	241,58
PLANADAS	1,08	0,114	10	1	247,82
VALDIVIA	1,10	0,114	10	1	252,21
SAN CARLOS	1,11	0,114	10	1	254,70
CHAPARRAL	1,13	0,114	10	1	258,38
URIBE	1,13	0,114	10	1	258,86
MESETAS	1,13	0,114	10	1	259,06
DABEIBA	1,17	0,114	10	1	268,76
TAME	1,19	0,114	10	1	271,64
VISTAHERMOSA	1,19	0,114	10	1	272,67
PUERTO RICO	1,19	0,114	10	1	272,72
SAN VICENTE DEL CAGUÁN	1,19	0,114	10	1	273,22
PUERTO ASÍS	1,19	0,114	10	1	274,01
MONTAÑITA	1,19	0,114	10	1	274,41
EL CARMEN DE BOLÍVAR	1,20	0,114	10	1	275,42
ARAUQUITA	1,21	0,114	10	1	276,27
TARAZÁ	1,21	0,114	10	1	277,34
TIBÚ	1,22	0,114	10	1	278,68
TEORAMA	1,22	0,114	10	1	278,76
TIERRALTA	1,22	0,114	10	1	279,32
TUMACO	1,23	0,114	10	1	280,64

3.2.2. Análisis teoría de pala

La teoría de elemento de pala funciona igual como la teoría de elemento de movimiento, tiene un comportamiento bidimensional, para realizar el análisis en el cual se debe conocer la velocidad inducida.

Una de las dificultades que presenta esta teoría es que se debe conocer las características geométricas de la hélice que usaremos en el drone. El cual es conocido este dato.

Lo primero que debemos calcular es la solidez de la hélice, que se define como el área efectiva de sustentación del rotor, y es la relación entre el área de las palas dividido el área imaginaria del disco en la hélice

$$\sigma = \frac{Nc}{\pi R}$$

Donde

N= número de palas de la hélice

c = cuerda de la pala

R = Radio de la hélice

La cuerda de la pala es la línea recta que une el borde de ataque con el borde de salida, siendo este el ancho de la pala, para conocer la cuerda se realizó dos procesos, se utilizó diseño para hallar la cuerda y esta se determinó en 2,244 cm. Remplazando los datos se obtiene los siguientes resultados:

$$\sigma = \frac{2 * (0,0244)}{\pi(0,381)} = 0,0407$$

Debido a que se desconoce el perfil aerodinámico de la hélice, se utilizó el perfil naca 0012²⁵ el cual cuenta con un espesor de 12% de la cuerda, donde las similitudes se asemejan a la hélice seleccionada, cuyas características son:

- Coeficiente de sustentación:

$$C_L = 5.73$$

- Coeficiente de resistencia

$$C_L = \delta_0 + \delta_2 \alpha^2$$

$$C_d = 0,0085 + 0,263 \alpha^2$$

Por consiguiente, calculamos el coeficiente de tracción C_T el cual se obtiene con la siguiente expresión:

$$C_T = \frac{4mg}{\rho \pi D^2 (\omega R)^2}$$

²⁵ ABBOTT, Ira Herbert; VON DOENHOFF, Albert Edward. *Theory of wing sections, including a summary of airfoil data*. Courier Corporation, 1959.

Donde:

W = velocidad angular de la hélice

La velocidad angular es una variable muy importante para el control de hexacoptero ya que de esta depende de la potencia consumida, con la TCM se obtuvo una potencia, la cual es proporcionada para los motores bruseles, el motor se aproxima para su selección tiene como velocidad media 4.440 rpm (464.956 rad/s) remplazando los datos obtenemos.

$$C_T = \frac{4(2,17) * (9,8)}{1,225 * \pi * 0,381^2(464,956 * 0,1905)^2}$$

$$C_T = 0.0194$$

Ahora hallamos el coeficiente de potencia inducida:

$$C_{P_{i0}} = \frac{C_T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2}}$$

$$C_{P_{i0}} = \frac{(0,0194)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2}}$$

$$C_{P_{i0}} = 1,910 * 10^{-3}$$

Además, se debe determinar el coeficiente de potencia parasita. Para ello se calcula a continuación el valor del paso colectivo Θ_0 para obtener la tracción requerida:

$$\theta_o = \frac{6C_T}{\sigma C_L} + \frac{3}{2} \sqrt{\frac{C_T}{2}}$$

$$\theta_o = \frac{6 * 0,0194}{0,047 * 5,73} + \frac{3}{2} \sqrt{\frac{0,0194}{2}}$$

$$\theta_o = 0,5799 \text{ rad}$$

Para calcular el coeficiente de velocidad inducida λ_{i0} se utiliza los cálculos realizados según la TCM así:

$$\lambda_{i0} = \frac{v_{i0}}{\omega R}$$

$$\lambda_{i0} = \frac{13,403}{464,956 * 0,1905}$$

$$\lambda_{i0} = 0,1513$$

Con los anteriores valores se procede a calcular el valor del coeficiente parasita:

$$C_{P0} = \frac{\sigma \delta_0}{8} \left[1 + \frac{\delta_2}{\delta_0} \left(\theta_0^2 - \frac{8}{3} \lambda_{i0} \theta_0 + 2 \lambda_{i0}^2 \right) \right]$$

$$C_{P0} = \frac{0,263 * 0,0085}{8} \left[1 + \frac{0,263}{0,263} * \left(0,5799^2 - \frac{8}{3} 0,1513 * 0,5799 + 2 * 0,1513^2 \right) \right]$$

$$C_{P0} = 3,2082 * 10^{-4}$$

Ahora se procede a realizar el cálculo de la potencia requerida para el vuelo a punto fijo utilizando la TEP con la siguiente expresión:

$$P_{i0} = (C_{Pi0} + C_{P0}) \rho \pi * \frac{D^2}{4} w^3 R^3$$

$$P_{i0} = (1,910 * 10^{-3} + 3,2082 * 10^{-4}) 1,225 * \pi * \frac{0,381^2}{4} 464,956^3 * 0,1905^3$$

$$P_{i0} = 216,50$$

3.2.2.1. Potencia en vuelo axial ascendente

En el caso del vuelo ascendente la tracción requerida es igual por lo que el coeficiente de tracción tiene el mismo valor calculado pero el coeficiente de velocidad inducida normal al plano varia y se calcula con la siguiente expresión:

$$\lambda_i = \frac{v_c + v_i}{\omega R}$$

La velocidad de ascenso que se está utilizando actualmente es de 6 m/s, y tomamos la velocidad inducida calculada en el TMC. De estos valores los remplazamos en la formula donde se obtiene el siguiente resultado.

$$\lambda_i = \frac{6 + 10,73}{464,956 * 0,1905}$$

$$\lambda_i = 0,1888$$

Para el cálculo del paso colectivo se realiza de acuerdo a la siguiente formula.

Para vuelo en ascenso:

$$\theta_o = \frac{6C_T}{\sigma C_L} + \frac{3}{2}\lambda_i$$

$$\theta_o = \frac{6 * 0,0194}{0,047 * 5,73} + \frac{3}{2} * 0,1888$$

$$\theta_o = 0,7154$$

Con el coeficiente de velocidad inducida se puede obtener el coeficiente de potencia inducida

$$C_{Pi} = \lambda_i * C_T$$

$$C_{Pi} = 0,1888 * 0,0194$$

$$C_{Pi} = 3,662 * 10^{-3}$$

De acuerdo a los datos obtenidos se efectúa el cálculo del coeficiente de potencia parasita

$$C_{P0} = \frac{\sigma \delta_0}{8} \left[1 + \frac{\delta_2}{\delta_0} \left(\theta_o^2 - \frac{8}{3} \lambda_i \theta_o + 2 \lambda_i^2 \right) \right]$$

$$C_{P0} = \frac{0,047 * 0,0085}{8} \left[1 + \frac{0,263}{0,263} * \left(0,7154^2 - \frac{8}{3} * 0,1888 * 0,7154 + 2 * 0,1888^2 \right) \right]$$

$$C_{P0} = 6,10689 * 10^{-5}$$

Finalmente se efectúa el cálculo de la potencia requerida para el vuelo axial ascendente utilizando la TEP

$$P_{i0} = (C_{Pi} + C_{P0}) \rho \pi * \frac{D^2}{4} w^3 R^3$$

$$P_i = (3,662 * 10^{-3} + 6,10689 * 10^{-5}) 1,225 * \pi * \frac{0,381^2}{4} * 464,956^3 * 0,1905^3$$

$$P_{i0} = 361,32 W$$

3.2.2.2. Potencia requerida TCM-TEP

De acuerdo a las anteriores teorías se determinó la potencia requerida utilizando 2 teorías, se observa que la TCM es mucho más fácil de aplicar, pero no tiene en cuenta ciertas consideraciones como la potencia parasita y la geometría de la hélice.

Por esta razón se utiliza el Factor de Merito para corregir los resultados obtenidos, utilizando la relación entre la potencia calculada y la potencia real, donde el valor oscila entre 0.5 a 0.8. Para obtener el Factor, se puede tomar de datos experimentales, pero como no se encuentran estos datos, se utilizarán los datos de TEP:

$$FM = \frac{\frac{C_T^3}{\sqrt{2}}}{C_{Pi} + C_{P0}}$$

Para el caso de vuelo a punto fijo se obtiene el siguiente valor:

$$FM = \frac{\frac{0,0194^3}{\sqrt{2}}}{1,910 * 10^{-3} + 3,2082 * 10^{-4}}$$

$$FM = 0,8564$$

Como los valores no son constantes se procede a calcular el factor de mérito para la velocidad en ascenso en 6m/s

$$FM = \frac{\frac{0,0194^3}{\sqrt{2}}}{3,662 * 10^{-3} + 6,10689 * 10^{-5}}$$

$$FM = 0,5132$$

Como la velocidad de ascenso es de 6 m/s se procede a calcular la potencia requerida en cada motor

$$P_{req} = \frac{P_i}{FM}$$

$$P_{req} = \frac{216,5015}{0,5132}$$

$$P_{req} = 421,87W$$

Para la selección del motor se utilizará un factor de servicio FS para asegurar que en ningún momento se llegue a la potencia máxima del motor y así evitar el daño de los componentes eléctrico. Por lo anterior la potencia del motor es:

$$P_M = 1,5 * P_{req}$$

$$P_M = 1,5 * 421,87W$$

$$P_M = 632,80W$$

3.2.3. Actuaciones del hexacoptero

Hallada la potencia instalada del hexacoptero, es necesario determinar las actuaciones del vuelo mismo. Por ello se determinará la capacidad operacional.

- Potencia inducida: es la potencia requerida para producir la tracción, se requiere en vuelo a punto fijo, cuando el vuelo es axial ascensional esta potencia disminuye.
- Potencia parasita de la hélice, es la potencia requerida para el movimiento del hexacoptero, encargada de vencer la resistencia que el aire presenta el movimiento del avance.
- Potencia ascensional, es la potencia requerida del hexacoptero

La potencia parasita de la estructura de grandes aeronaves es importante debido a que, a mayor área de superficie, mayor será la resistencia que realice al avance de la aeronave, además suele ser la potencia más importante a velocidades altas. Esta potencia por consiguiente en el hexacoptero es despreciable debido a que el área es mínima y su diseño disminuirá la resistencia que el aire representa en él. De igual manera de acuerdo a la misión específica como la búsqueda de minas antipersonales no requiere realizar misiones de altas velocidades.

En vuelo de avance se realizará un análisis de TMC, tomando en cuenta la potencia parasita de la hélice y de la estructura se utilizará el factor de mérito 0,5132. Entonces con las siguientes consideraciones según la TMC la tracción del hexacoptero es igual a:

$$T = 2\rho(\pi R^2)v_i\sqrt{(v_a\cos\alpha_r)^2 + (v_a\sin\alpha_r + v_a)^2}$$

Donde:

V_a velocidad de avance
 α_r ángulo de ataque

El ángulo de ataque corresponde al formado entre la hélice y la horizontal, el cual por lo general es de un valor por bajo, para este análisis se tomó un valor de 15°. La velocidad inducida para vuelo horizontal es igual a

$$\frac{v_i}{v_{i0}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{4 + \left(\frac{v_a \cdot \cos \alpha_r}{v_{i0}} \right)^4} - \left(\frac{v_a \cos \alpha_r}{v_{i0}} \right)^2 \right]}$$

La potencia para esta maniobra según la TMC es igual a:

$$P_\alpha = T(v_\alpha \cdot \sin \alpha_r + v_i)$$

Al combinar las ecuaciones del empuje y la potencia se obtiene:

$$P * FM = 2\rho(\pi R^2)v_i \sqrt{(v_a \cos \alpha_r)^2 + (v_a \sin \alpha_r + v_a)^2} * (v_\alpha \cdot \sin \alpha_r + v_i)$$

$$v_a = 5,606 \frac{m}{s}$$

Este valor representa el valor máximo que puede tomar la aeronave en vuelo de avance. Para no disminuir la autonomía del hexacoptero se tomará una velocidad de 5 m/s. al realizar el cálculo con la TMC se obtiene el siguiente resultado.

$$P_\alpha = T(v_\alpha \cdot \sin \alpha_r + v_i)$$

$$P_\alpha = 50,176(5 \cdot \sin 15 + 10,73)$$

$$P_\alpha = 603,32$$

La potencia calculada se encuentra por debajo de la potencia instalada, obteniendo el correcto funcionamiento de los motores, aumentando la autonomía de la aeronave.

3.2.4. Calculo de autonomía del hexacoptero

La autonomía es un factor importante a la hora de diseñar, así como la selección de componentes de UAV. La autonomía es el tiempo de vuelo de acuerdo a la batería, que se ha instalado y el consumo energético. En un hexacoptero se puede diferenciar tres tipos de movimientos, Vuelo en punto fijo, vuelo axial ascendente y vuelo de avance horizontal.

Para la selección de los datos se seleccionó los valores máximos de funcionamiento, donde la velocidad puede variar entre 5 y 6m/s. a continuación se relacionan las potencias de las anteriormente nombradas:

- Potencia de vuelo a punto fijo: 216,50W
- Potencia en vuelo axial ascendente: 361,32 W
- Potencia en vuelo de avance horizontal: 603,32W

Conociendo las características técnicas de los motores, estos deben alimentarse a 22,2V, es decir, que la batería a implementar debe ser de 6 celdas. A partir de este voltaje se puede determinar la corriente de cada movimiento a partir de la Ley de Ohm.

$$I = \frac{P}{V}$$

Por lo tanto, las intensidades para dichos movimientos son:

- Corriente en vuelo a punto fijo $i_o=9,75$ A
- Corriente en vuelo axial ascendente $i_i=16,28$ A
- Corriente en vuelo de avance horizontal $i_{av}=27,18$ A

Teniendo en cuenta que la mayor parte del tiempo el dron realizará su misión en vuelo horizontal, se considerará que el dispositivo estará un 70% en vuelo horizontal, un 15% en vuelo a punto fijo y un 15% en vuelo ascendente.

Por lo anterior, la capacidad requerida de acuerdo a los tiempos establecidos para el hexacoptero es:

$$C_r = N_r(0,7 * t * i_{av} + 0,15 * t * (i_i + i_o)) * \eta$$

Donde

$N_r =$ Numero de motores

$i_{av} =$ Intensidad en vuelo de avance horizontal

$i_o =$ Intensidad de vuelo a punto fijo

$i_i =$ Intensidad de vuelo axial ascendente

$t =$ tiempo de vuelo

$\eta =$ coeficiente de seguridad

Se aplicará un coeficiente de seguridad de 1,15 ya que anteriormente hemos estimado un factor de seguridad en los motores, y este factor de seguridad se contemplará para los equipos electrónicos que consumen energía. Por lo tanto, la capacidad de vuelo será de 1 hora.

$$C_r = 6(0,7 * 1h * 27,18 + 0,15 * 1h * (16,28 * +9,75)) * 1,15$$

$$C_r = 158,19A = 158.190 mAh$$

Con este valor podemos determinar el tiempo de vuelo de nuestro hexacoptero para determinar la autonomía para una batería de 10.000 mAh, la cual se desea instalar en el hexacoptero.

Efectuando el despeje en t de la anterior ecuación se efectúa el cálculo:

$$t = \frac{C_r}{N_r \eta (0,7 * i_{av} + 0,15 * (i_i + i_o))}$$

$$t = \frac{10}{6 * 1,5 * (0,7 * 27,18 + 0,15 * (16,28 * +9,75))} * \frac{60min}{1h}$$

$$t = 4,362 \text{ min}$$

Debemos tener en cuenta que hemos utilizados los factores de seguridad para poder determinar las potencias establecidas contando con factores de seguridad para poder realizar la misión deseada. Es decir que nuestro factor de seguridad de 4 en los cálculos de los motores podremos obtener 4 veces el tiempo que requerimos es decir de 16 minutos. Aunque no es el ideal se debe tener en cuenta que tenemos mas

3.2.5. Análisis estructural

3.2.5.1. Estudio a flexión del brazo del drone. Ley de momentos flectores

Generando el estudio de la flexión en el brazo del drone se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros.

1. Longitud L = Distancia entre el punto de anclaje en la estructura y punto de anclaje del motor donde se originan las fuerzas derivadas del propio motor L = 273 mm
2. Diámetro exterior = 24.82 mm
3. Diámetro Interior = 22.96 mm

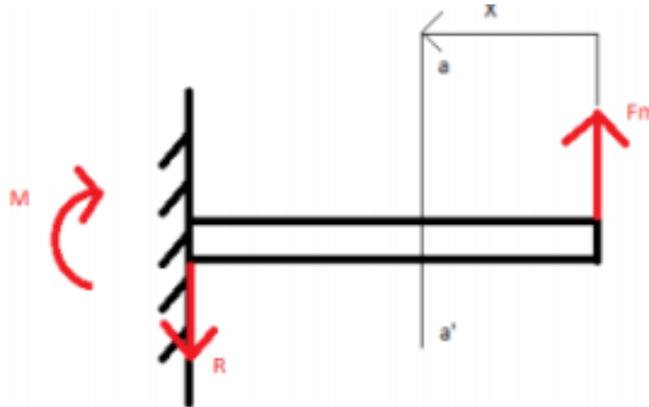
Figura 36 Brazo del drone



Por lo tanto, para el análisis de momento flector del brazo donde debemos tener en cuenta lo siguiente:

1. La fuerza de empuje que es generada por las hélices del drone no es constante debido a que se genera un momento variable; obedeciendo el principio de acción reacción de NEWTON, por lo mismo mantener una resistencia.

Figura 37 Fuerza aplicada en el brazo



Donde:

- F_m = Fuerza de empuje que genera el motor.
- X = distancia donde se evalúa el momento.
- R = momento de empotramiento generado por la fuerza de empuje F_m .

Se tiene que el peso del drone DJI S900 de acuerdo a las características técnicas corresponde a 5,18 kg. Al ser un hexacoptero cada motor se encarga de levantar un peso de 0,863 kg.

La fuerza de empuje está dada por:

$$\frac{F_m}{\text{Peso}} > 4 \rightarrow F_m > 4 * \text{Peso}$$

$$F_m > 4(0,863 \text{ kg}) \rightarrow F_m > 3,452 \text{ Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \rightarrow F_m > 33,86 \text{ N}$$

Mediante las ecuaciones de estática

$$\sum F_m = 0$$

$$\rightarrow F_m - R = 0 \rightarrow F_m = R \rightarrow R = 33,86 \text{ N}$$

$$\sum M_{x=L} = 0$$

$$M - F_m * L = 0 \rightarrow M = F_m * L \rightarrow M = 33,86 * 273 \text{ mm} = 9243.78 \text{ Nmm}$$

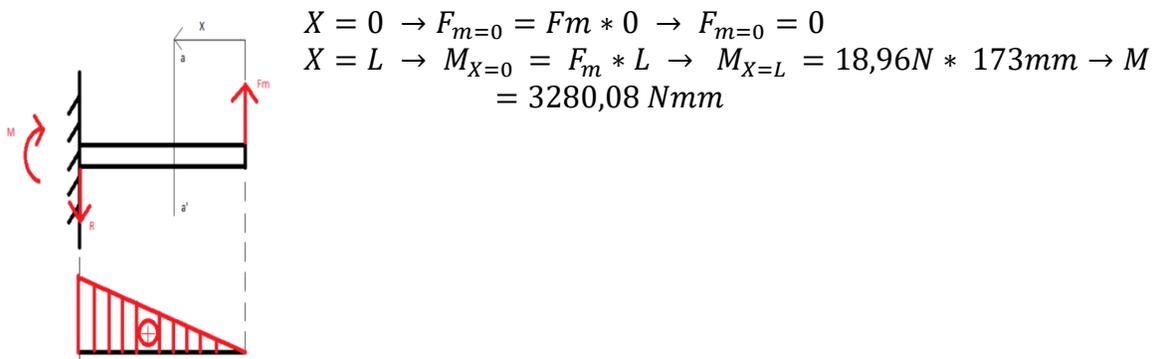
De manera que para el cálculo de los momentos flectores se determina la sección a-a. La variable X determina la longitud en la que se realiza el estudio de sección a

$$M_{a-a'} = F_m * X$$

Siendo $0 \leq X \leq L$

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

Figura 38 Diagrama del momento flector



3.2.5.2. Distribución de tensiones normales debido al momento flector

De acuerdo a la ley de Navier se encontró el valor de la tensión, por lo que tenemos la distancia longitudinal y radial para el caso de un tubo.

$$\sigma_{x,y} = \frac{M(x)}{I_z}$$

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 la aplicación de la fuerza de empuje realizada por el motor.

I_z = Momento de inercia del eje perpendicular Z. Supone la resistencia de giro respecto dicho eje que proporciona el elemento estructural.

Y = Distancia desde el centro del tubo al exterior, comprendía entre el radio interior y radio exterior.

Por lo tanto, aplicando la ecuación se tiene que

$$\sigma_{x,y} = \frac{M(x)}{I_Z} * y \rightarrow \sigma_{x,y} = \frac{F_m * L}{I_Z} * R \rightarrow \sigma_{x,y} = \frac{18,96 * 173}{I_Z} * R$$

Donde I_Z es de:

R = Radio exterior del tubo
 r = Radio interior del tubo.

$$I_Z = \frac{\pi}{4} * (R^4 - r^4)$$

$$I_Z = \frac{\pi}{4} (24.82^4 - 22.96^4) = 79793,7 \text{ mm}^4$$

Así que resolviendo la ecuación general tenemos que

$$\sigma_{x,y} = \frac{18,96 * 173}{\frac{\pi}{4} (24.82^4 - 22.96^4)} * 24,82 = \sigma_{x,y} = 1,02 \text{ MPA}$$

De manera que este resultado podremos determinar el factor de seguridad con respecto a las propiedades de la fibra de carbono.

$$FS = \frac{\sigma_x \text{ lim}}{\sigma_x \text{ MAX}} = \frac{513}{1,02} = 502$$

El valor que corresponde a $FS = 502$, como factor de seguridad corresponde al valor máximo cuando equivale al radio exterior como se visualiza en la figura que se relaciona a continuación, donde se aprecia la distribución de tensiones en un eje, de manera que el valor de la tensión a compresión de la fibra superior debido a la flexión tiene el mismo valor 1,02 MPa.

Figura 39 Distribución de tensiones



3.2.5.2. Momentos de Inercia

Dado a que la ecuación general para obtener el valor de tensión cortante

máximo.

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

Conociendo la tensión cortante máxima de se sitúa a la altura del eje Z, allí donde la tensión normal provocada por el momento flector es nula, el diferencial de Z equivale a dos veces el espesor, por lo tanto, la ecuación se redefine como:

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

Por lo que se realizan los siguientes procedimientos:

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

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

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

Se simplifica dado a que el valor del área de una sección cualquiera del tubo.

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

Donde

V = Esfuerzo cortante

A = Área del tubo

$$t = \frac{4}{3} * \frac{18,96}{\pi (24.82^2 - 22.96^2)} * \frac{24.82^2 + 24,82 * 22.96 + 22.96^2}{24.82^2 + 22.96^2} = 0,135 \text{ MPA}$$

El factor de seguridad

$$FS = \frac{\sigma_x \text{ lim}}{\sigma_x \text{ MAX}} = \frac{120}{0,135} = 888,8$$

Donde se analiza que el factor de seguridad del momento flector con respecto a al momento de inercia cortante, produce una mayor flexión es por ello que

los brazos del DJI S900 cuentan con ergonomía y soportan una mayor flexión.

3.2.5.3. Calculo de la deflexión del brazo

El dron seleccionado el DJI S900 en sus especificaciones técnicas su estructura está elaborada en fibra de carbono de manera que esto le permite ser más resistente con respecto a otros materiales, la cual nosotros conservamos el mismo material debido a que el fabricante ya estableció sus parámetros.

$$\delta_{max} = \frac{FmL^3}{3EI} \rightarrow \delta_{max} = \frac{33,86 * 273^3}{3 * 100000 * 79793,7} = 0.0287 \text{ mm}$$

3.2.5.4. Estudio de tensiones del cuerpo estructural del dron

Debido a que se trata de la incorporación de un detector de metales a un dron, se debe tener presente lo siguiente:

1. La estructura del detector ira sujeta a la placa inferior del dron como se muestra en la figura.
2. El análisis se realiza únicamente de forma teorica ya que no contamos con el dron y detector de metales de forma física.
3. Se conoce que nuestro detector tiene un peso 2,5 kg, esta carga se divide en los dos ejes es decir que soportan 1,25 kg en cada eje, por lo tanto, el detector obtiene un valor de 0,625 kg.
4. Realizando la sumatoria de fuerzas nos da $F_{eje} = 6.125 \text{ N}$
5. Ecuación de momentos

$$\sum F_{MA} = 0 \rightarrow F_{MOTOR} * D_1 - R_1 * D_2 = 0$$

Conociendo que:

$$F_{MOTOR} = 2,5 \text{ gramos (en cada motor)} = 24.5 \text{ N}$$

$$D_1 = 358 \text{ mm}$$

$$D_2 = 60 \text{ mm}$$

$$R_1 = \frac{F_{MOTOR} * D_1}{D_2} = \frac{24.5 * 358}{60} = 146.18 \text{ N}$$

Generando la sumatoria de las fuerzas

$$\sum f_Y = 0 \rightarrow F_{MOTOR} + R_2 - R_1 = 0 \rightarrow R_2 = R_1 - F_{MOTOR}$$

$$R_2 = 146.18 - 24.5 = 121.6 \text{ N}$$

Sumatorias de momentos respecto al punto A para determinar el punto de reacción.

$$\sum M_A = 0 \rightarrow R_1 * d_1 - R_{BY} * d_1 - F_{eje} * d_2 = 0 \rightarrow$$
$$R_{BY} = \frac{R_1 * d_1 - F_{eje} * d_2}{d_1} = \frac{146,18 * 358 - 6,125 * 60}{358} = 145,15 N$$

De manera que como el resultado dio de forma positiva significa que la orientación correcta inicialmente.

Realizando sumatorias de fuerzas sobre el eje vertical se obtiene el valor de R_{AY}

$$R_{AY} = F_{eje} + R_{by} + R_2 - R_1 \rightarrow R_{AY} = 6,125 + 145,15 + 121,6 - 146,18$$
$$= 126,6 N$$

3.3. SELECCIÓN DE COMPONENTES

De acuerdo al anterior estudio se seleccionó la utilización de un drone de 6 brazos o hexacoptero observando que es la mejor opción para la búsqueda de minas antipersonales. Para ello se realiza la selección del drone de acuerdo a lo que actualmente en el mercado nos puede ofrecer. Por ello se realizó la selección del drone DJI S 900 el cual cuenta con las siguientes características:

Su diseño compacto y ligero hace que sea fácil de llevar en cualquier lugar y crear imágenes aéreas increíbles sobre la marcha, es por ello que decidimos hacer el uso de este drone ya que nos permite por su diseño y ergonomía cumplir con nuestra misión del proyecto de grado, teniendo en cuenta que está diseñado con los motores más avanzados y controladores electrónicos de velocidad, un chasis fibra de carbono robusto y un sistema de distribución de energía de nuevo diseño, el S900 le da el poder, la fuerza y la estabilidad ya que sus brazos y tren de aterrizaje están hechos de fibra de carbono resistente, lo que reduce el peso al tiempo que aumenta la estabilidad y permite tener más tiempo en vuelo sin sacrificar el rendimiento.

Cuenta con un peso 3,3 kg, siendo su peso máximo de despegue de 8,2 kg, permitiendo cargar nuestro detector de metales sin afectar su estabilidad.

El tren de aterrizaje es retráctil de forma que este diseño, en nuestro proyecto en zonas boscosas para la detección de minas nos permitirá tener un mayor

alcance debido a que Colombia cuenta con mucha zona montañosa.

Cuenta con Vibraciones reducidas; es decir su sistema del soporte cuenta con una separación entre el bastidor principal por amortiguadores, lo que reduce la vibración llegando a una mayor estabilidad en el cuerpo.

En la configuración de la placa central es extraíble, lo que permite instalar el controlador de vuelo, de una manera sencilla ya que si vamos a la realidad ya cuando se estén ejecutando las pruebas en campo y se requiera inspeccionar algún componente del drone esta configuración de diseño nos ahorra tiempo ya que no tenemos que desarmar todo un sistema.

En dado caso que se requiera del uso de cámaras para el tema de inspección del terreno este drone también es compatible con Zenmuse es decir que también le podríamos adecuar este tipo de cámaras.

Su innovador diseño de brazo está diseñado con 8 ° y 3° de inclinación, por lo que la aeronave es más estable cuando se balancea y cabecea, todavía más estable cuando se gira.

Un controlador de velocidad electrónico de 40A (ESC) está integrada en cada brazo. Combinado con los motores 4114 pro, las helices son de 15x5,2" plegables, y el diseño de plegado de tipo V, el S900 tiene un empuje máximo de 2,5 kg.

Su motor adopta un único diseño de estator de alambre, que ofrece una mejor disipación de calor, un mejor rendimiento, y un sistema más ordenado, más fiable.

3.3.1. Componentes seleccionados de acuerdo a sus características técnicas

Batería: De acuerdo a sus especificaciones técnicas ella debe ser tipo LiPo (6S, 10000mAh~15000mAh, 15C(Min), de manera que en nuestro proyecto y junto a las especificaciones técnicas del drone tenga una duración de vuelo de 16 min mixto con un peso 7,2 kg de despegue, con un consumo máximo de energía de 3000 W y un consumo de energía en el aire 1000 W.

Hélices: Debido a su configuración aerodinámico que son plegables su referencia de uso son (1552/1552R), material son elaborados en plástico ya que nos ofrece alta resistencia y poco peso, dado que es un máximo por hélice de 13kg

ESC: Para la configuración de la corriente de trabajo es de: 40 A, la frecuencia de señal 30Hz – 450Hz su peso incluyendo los radiadores 35g.

La ventaja de hacer el uso de esta es que también puede ser usada la del DJI

4114 para tener un mayor desempeño en el diseño del estator.

Motor: debe tener un KV de 400 rpm/ V, con una potencia máxima: 500 W y un peso 158

3.4. DISEÑO DEL PROTOTIPO

Se realizó el diseño del drone S900 en 3D con el fin de observar y realizar análisis de la estructura y por supuesto verificar la correcta ubicación del detector de metales con el fin de cumplir con la misión establecida.

Figura 40 Diseño 3D del drone DJI S900



De acuerdo a las especificaciones establecidas, y los elementos necesarios para el drone se realiza el diseño de una placa con el fin de colocar nuestro detector de metales y no perder la estabilidad que necesita el drone para este caso. La señal será enviada vía radio y el computador tendrá un receptor el cual hace la recepción de los datos y los transforma dentro de la plataforma indicándonos que hay una presencia de una mina, quedando registrada dentro del misión planner en tiempo real.

Figura 41 Roscado del Detector de metales

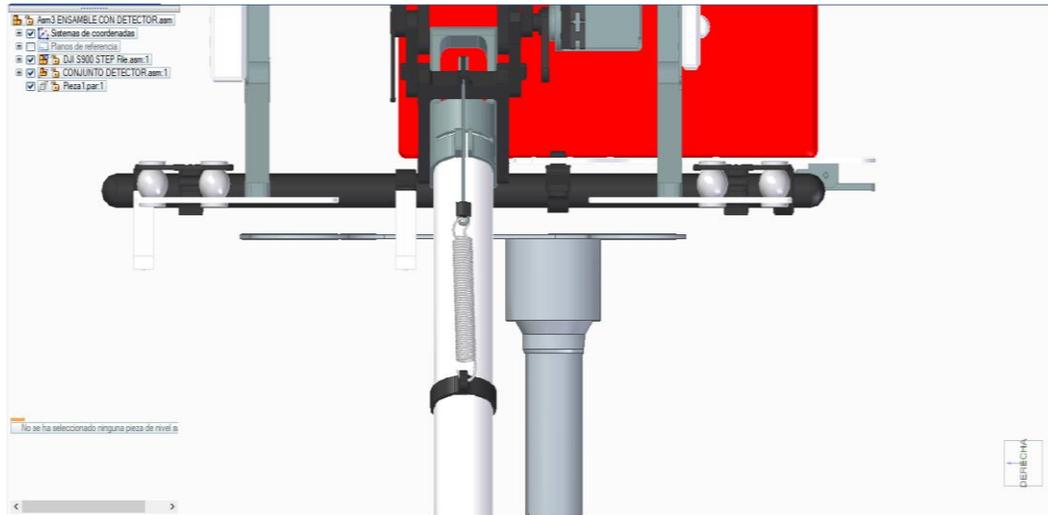
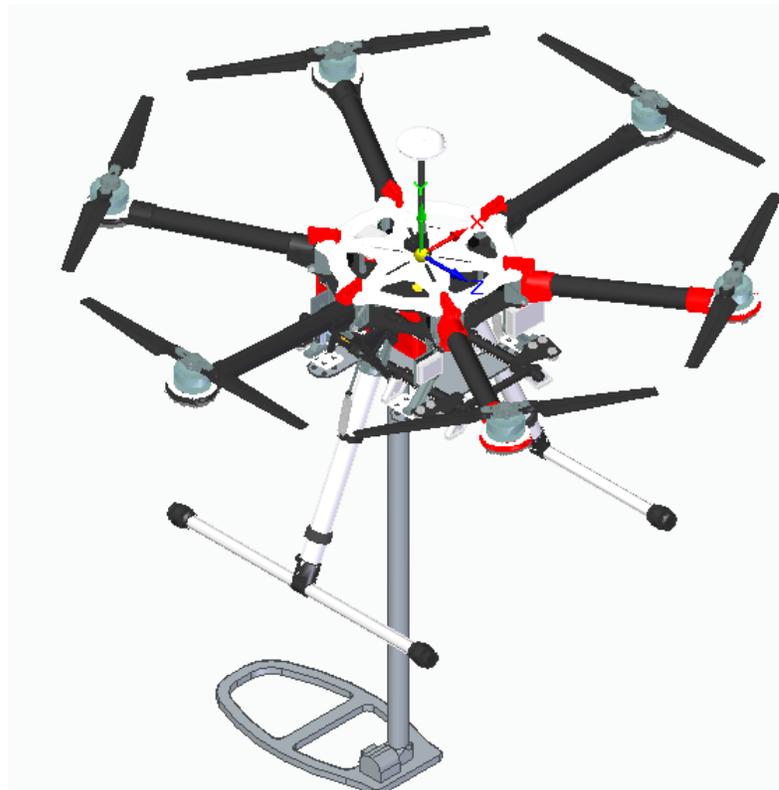


Figura 42 vista 3D del Hexacopter con el Detector de metales



4. ANALISIS Y RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS CENTRO DE GRAVEDAD

En esta sección se presentará una explicación del peso y balance de nuestro dron DJI S900, por lo tanto, hablamos inicialmente sobre un CENTRO DE GRAVEDAD (C.G). Donde es el punto de equilibrio de un cuerpo o el balance de la aeronave, de manera que el CG debe estar situado en un punto donde todas las fuerzas están en equilibrio, estos cálculos son necesarios para encontrar el peso y balance ya que afecta directamente cuando se le incluye el detector de metales al dron.

Para nivelar nuestro dron longitudinal, la cual se tuvieron en cuenta los siguientes procedimientos:

- El dron debe permanecer en una superficie plana, dura y recta.
- La aeronave debe estar completamente limpia.
- Al dron se le realiza la instalación del dispositivo del detector de metales.
- Para efectos de precisión la aeronave no puede ser pesada en ambientes abiertos.

Para ello debemos tener en cuenta lo siguiente.

Tabla 20 Pesos de los componentes de la aeronave

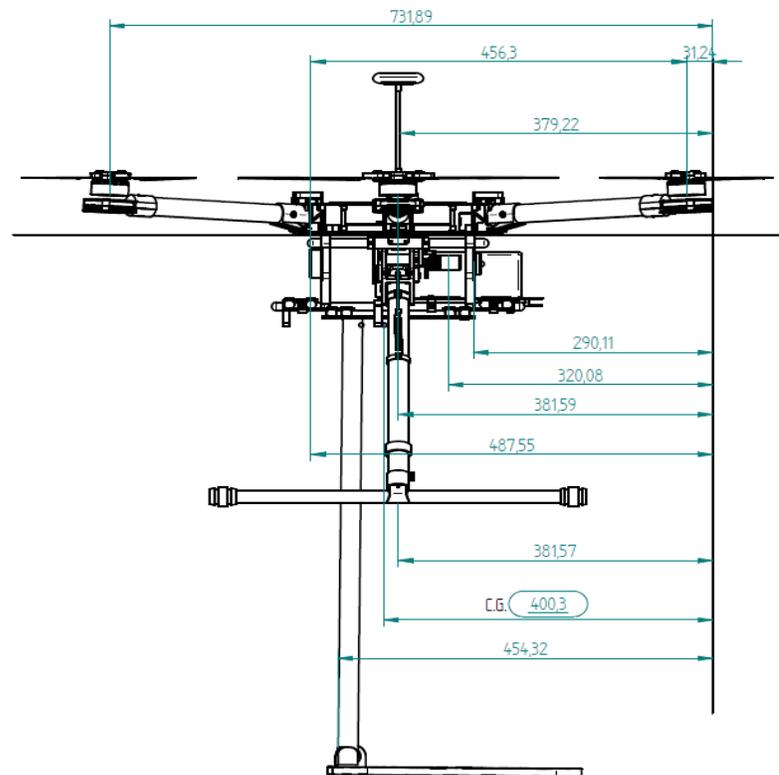
COMPONENTE	Cantidad	Peso en gr
TREN ATERRIZAJE	2	875
HELICE SEC1	2	19,4
MOTOR SEC1	2	300
ECS SEC1	2	81,6
HELICE SEC2	2	19,4
MOTOR SEC2	2	300
ECS SEC 2	2	81,6
HELICE SEC3	2	19,4
MOTOR SEC 3	2	300
ESC SEC3	2	81,6
BATERIA	1	1460
GPS	1	29
CONTROLADORA	1	224
PMU	1	27

COMPONENTE	Cantidad	Peso en gr
DETECTOR METALES	1	2500

En la anterior tabla se pasaron todos los pesos a Libras para los momentos del Drone.

Se determina los puntos de referencia para tomar los puntos de distribución, de acuerdo a la imagen que se relaciona a continuación de manera que las medidas serán cambiadas a metros.

Figura 43 Distancias de los componentes vs Datum



Por lo tanto, al situar cada uno de los pesos bajo su distribución de distancia y al convertir los mm a metros nos queda la tabla que se relaciona a continuación.

Tabla 21 Distancias referente a Datum

COMPONENTE	Cantidad	Distancias en mm	DISTANCIA mts
TREN ATERRIZAJE	2	381,51	0,38151

COMPONENTE	Cantidad	Distancias en mm	DISTANCIA mts
HELICE SEC1	2	31,24	0,03124
MOTOR SEC1	2	31,24	0,03124
ECS SEC1	2	31,24	0,03124
HELICE SEC2	2	381,59	0,38159
MOTOR SEC2	2	381,59	0,38159
ECS SEC 2	2	381,59	0,38159
HELICE SEC3	2	731,89	0,73189
MOTOR SEC 3	2	731,89	0,73189
ESC SEC3	2	731,89	0,73189
BATERIA	1	320,08	0,32008
GPS	1	379,22	0,37922
CONTROLADORA	1	487,55	0,48755
PMU	1	487,55	0,48755
DETECTOR METALES	1	454,32	0,45432

Se calcula los momentos en cada componente, tal como se relaciona en la próxima tabla.

Tabla 22 Momento de cada componente

COMPONENTE	Peso en kg	Distancia mts	Momento
TREN ATERRIZAJE	0,875	0,38151	0,33382125
HELICE SEC1	0,0194	0,03124	0,00060606
MOTOR SEC1	0,3	0,03124	0,009372
ECS SEC1	0,0816	0,03124	0,00254918
HELICE SEC2	0,0194	0,38159	0,00740285
MOTOR SEC2	0,3	0,38159	0,114477
ECS SEC 2	0,0816	0,38159	0,03113774
HELICE SEC3	0,0194	0,73189	0,01419867
MOTOR SEC 3	0,3	0,73189	0,219567
ESC SEC3	0,0816	0,73189	0,05972222
BATERIA	1,46	0,32008	0,4673168
GPS	0,029	0,37922	0,01099738
CONTROLADORA	0,224	0,48755	0,1092112
PMU	0,027	0,48755	0,01316385
DETECTOR METALES	2,5	0,45432	1,1358

Para localizar el C.G de la aeronave se tomó la sumatoria de los momentos dividido en la sumatoria de los pesos.

Tabla 23 Centro de Gravedad

C.G. DRONE CON DETECTOR	TOTAL PESO	TOTAL MOMENTOS
0,4003	6,318	2,5293

De manera que el C.G. de la aeronave se encuentra dentro del rango de la distancia de forma correcta, permitiendo que la aeronave no se afecte su sustentación o equilibrio.

4.2. SOFTWARE PARA LA SIMULACION

4.2.1. ACTUALES SISTEMAS

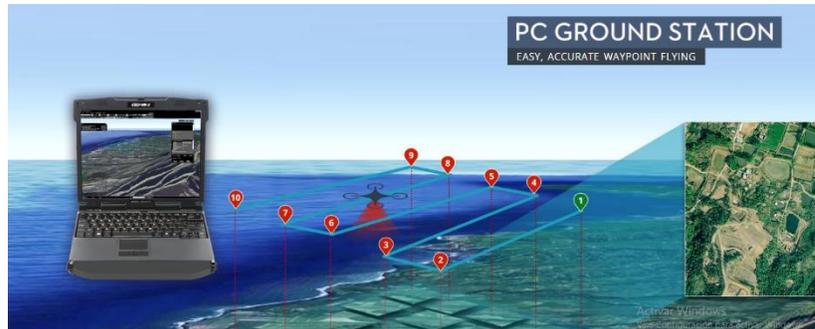
Una de las ventajas del realizar diferentes misiones con los drones, es poder efectuar la automatización de las misiones que se desean realizar con los diferentes sistemas de programación con el fin de poder minimizar el error humano de utilizar el control remoto, y que el drone efectúe un trabajo más eficiente y correcto, con el fin de obtener la información requerida y poder efectuar análisis de la información requerida y efectuar nuevas misiones con mayor efectividad.

Para la utilización del sistema de simulación de drones se pueden obtener los siguiente:

1. AirSim: es un simulador para drones, coches y más construido en Unreal Engine. Es de código abierto, plataforma cruzada y soporta hardware en bucle con controladores de vuelo populares como PX4 para simulaciones físicas y visualmente realistas. Se desarrolla como un plugin de Unreal que puede simplemente caer en cualquier entorno de Unreal que desee.
2. DJI GROUND STACIÓN: DJI se ha caracterizado por estar siempre a la vanguardia de la tecnología de drones, y siendo este su finalidad, cuenta con la plataforma de estación para el manejo de sus drones a cortas y largas distancias el cual, cuenta con las siguientes características (DJI):
 - Interfaz intuitiva
 - Mapas en 3D de google.
 - Algoritmos de control de Vuelo preciso.
 - Monitoreo de vuelo en tiempo real.
 - Regreso automatico a casa.

- Control con jostick o teclado.
- Cambios de vuelo durante la misión.
- Waypoints personalizables.
- Simulación antes de efectuar la misión de vuelo.
- Cargue de misiones de vuelo.

Figura 44 Estación de tierra DJI



Fuente: DJI, <http://www.dji.com/es/pc-ground-station>

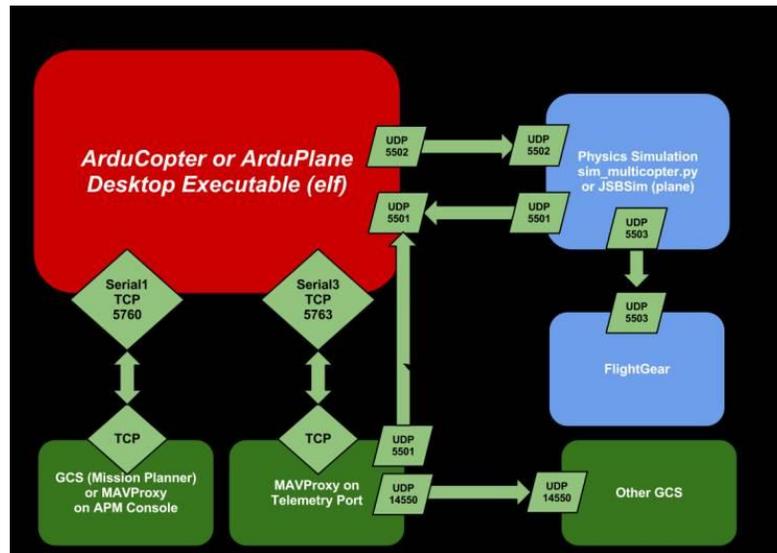
3. STLI simulator ardupilot: SITL permite ejecutar ArduPilot directamente en el computador, sin ningún hardware especial. ArduPilot es un piloto automático portátil que funciona en una gran variedad de plataformas.

Cuando se ejecuta en SITL los datos del sensor provienen de un modelo de dinámica de vuelo en un simulador de vuelo. ArduPilot tiene una amplia gama de simuladores de vehículos incorporados, y puede interactuar con varios simuladores externos. Esto permite que ArduPilot sea probado en una variedad muy amplia de tipos de vehículos. Por ejemplo, SITL puede simular:

- Aviones multi-rotor
- Aeronave de ala fija
- vehículos terrestres
- monitores de cámara
- rastreadores de antenas
- una amplia variedad de sensores opcionales, tales como Lidars y sensores de flujo óptico

En la figura los números de puerto son indicativos solamente y pueden variar. Por ejemplo, los puertos entre ArduPilot y el simulador de la imagen son 5501/5502 pueden variar para ser 5504/5505 u otros números de puerto dependiendo de su entorno.

Figura 45 Arquitectura software simulación



Fuente: <http://ardupilot.org/dev/images/ArdupilotSoftwareintheLoopSITL.jpg>

4.3. SIMULACIÓN

Para efectuar la simulación de nuestro proyecto se realizó la selección del simulador ardupilot STLI. Es importante recordar que la plataforma de STLI fue desarrollada originalmente en Linux, más sin embargo se puede efectuar su instalación en Linux y Windows. Para efectuar esto se realizó la instalación correspondiente de acuerdo a las siguientes instrucciones realizadas en la página:

1. instalar mavproxy.
2. Instalar el Cywin.
3. Configure directorios y rutas de cywing.
4. Instalar los paquetes Python necesarios.
5. Abrir (reabrir) *Cywing Terminal* y clonar el repositorio Github ArduPilot.
6. Instalación del mission planner.
7. Efectuar la conexión.

Cuando se ejecutan estos pasos de acuerdo al orden establecido por ardupilot, se inicia a configurar el SIMVEHICLE.PY el cual establece el tipo de drone que se utilizara para la misión que se desee realizar. Es importante tener en cuenta los parámetros iniciales del drone como se estableció en el capítulo anterior, con el fin de iniciar a efectuar los cambios y poder determinar si nuestra configuración es funcional y la misión que se desea realizar cumple con los parámetros de tiempo de vuelo.

Para la respectiva modificación de estos archivos se debe realizar dentro de la plataforma Python con el fin de efectuar el adecuado ingreso del código, y en

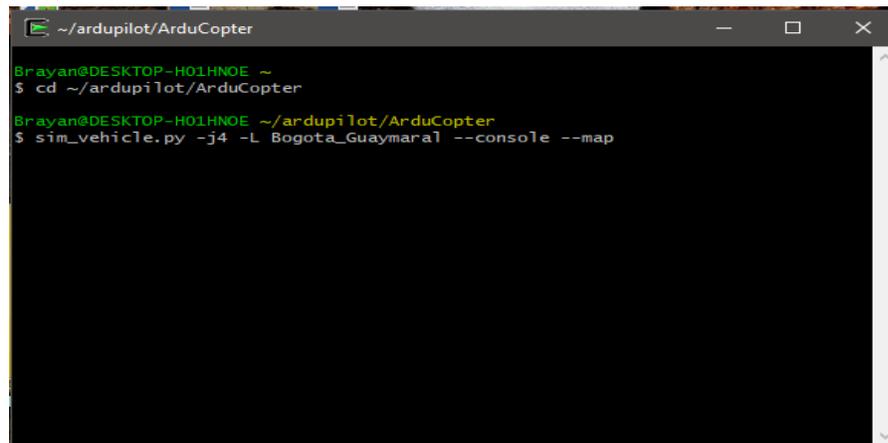
la línea correcta. Lo anterior para no generar error en el archivo cuando el programa CYWING llame el archivo para el cargue dentro de la plataforma y se pueda ejecutar con normalidad.

Dentro de la plataforma misssion planner se puede realizar misiones de reconocimiento o misiones de barrido con el fin de poder valorar un terreno y de acuerdo a la creación del archivo, para

Se debe iniciar el proceso de simulación con la instalación de los programas de acuerdo con las instrucciones establecidas por Ardupilot, se realiza la instalación del Cygwin, seguida el Mavproxy y posterior el Mission Planner, una vez instalado se procede a abril el programa Cygwin, se realiza la búsqueda del directorio Arducopter, y buscamos el archivo sim_vehicle.py, seleccionamos la configuración -j4, y buscamos la ubicación donde se realizará el proceso de simulación. Es importante aclarar que, durante este proceso los lugares para realizar cualquier tipo de simulación se deben agregar, junto con las coordenadas en el archivo C:\cygwin64 \ home \ usuario \ ardupilot \ Tools \ autotest \ locations.txt. de acuerdo a lo establecido en el anexo D donde se establece el nombre, la latitud, la longitud, la altitud absoluta, y su heading.

Se llama el archivo sim_vehicle.py el cual se encuentra dentro de la carpeta arducopter y se encuentra configurado con los parámetros para un multicoptero.

Figura 46 Programa Cywing



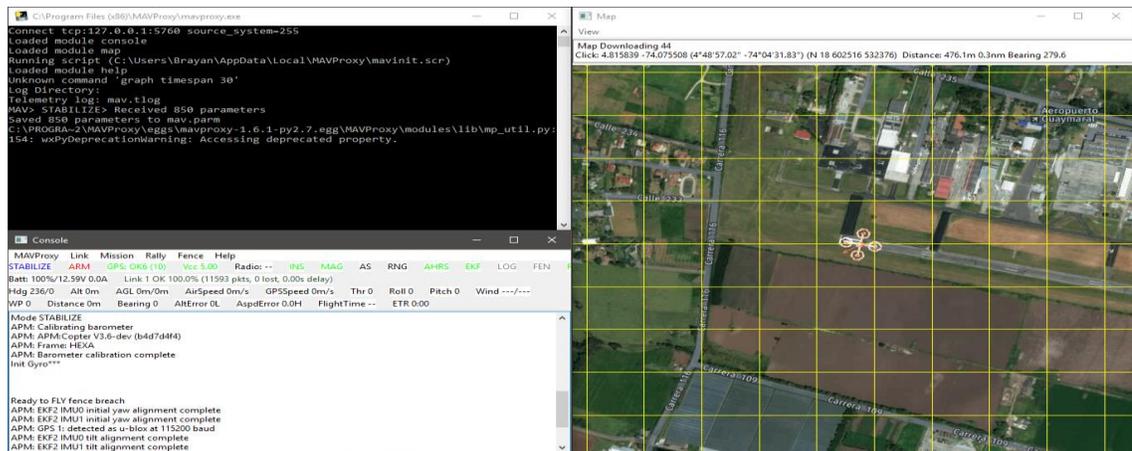
```
~/ardupilot/ArduCopter
Brayan@DESKTOP-H01HNOE ~
$ cd ~/ardupilot/ArduCopter
Brayan@DESKTOP-H01HNOE ~/ardupilot/ArduCopter
$ sim_vehicle.py -j4 -L Bogota_Guaymaral --console --map
```

El programa se encuentra configurado para que automáticamente ejecute el programa mavlink, cuando se complementa con los comandos -console y -map. Inicialmente el programa se conecta con un puerto donde se encuentra configurado el vehículo simulado, donde se debe configurar desde su archivo sim_vehicle.py con un editor de código de fuente su configuración predeterminada, para que se establezca como requisito mínimo sea un hexacoptero, como se aprecia Figura 47, en este se establecen la

configuración del frame, calibración del barómetro, calibración del giróscopo, calibración del sistema IMU, además de poder observar la ubicación en el mapa del dron.

De igual manera se puede apreciar el voltaje, velocidad el viento, y la ubicación exacta del dron (latitud, longitud, altitud). Teniendo en cuenta que desde este parámetro se realizara la misión establecida, determinando el área de búsqueda.

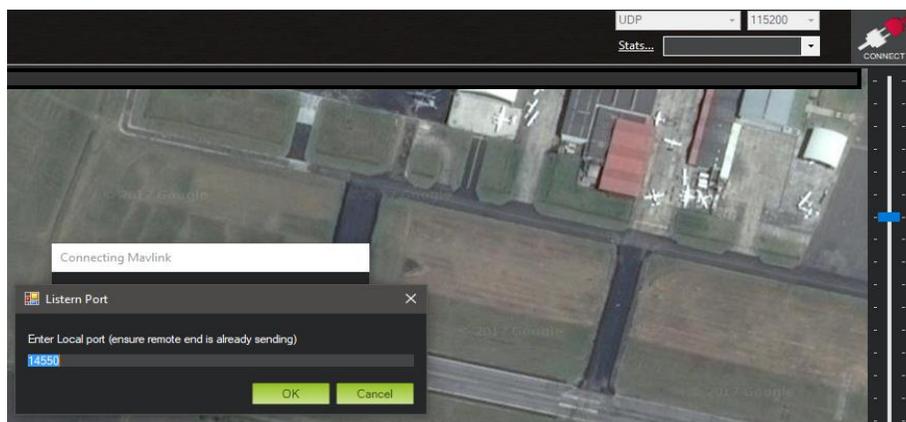
Figura 47 Mavlink configurada con Cywing



Para poder realizar una simulación más adecuada, se utilizó el programa Misión Planner con el fin de establecer adecuadamente las trayectorias de búsqueda para la detección de minas antipersonales.

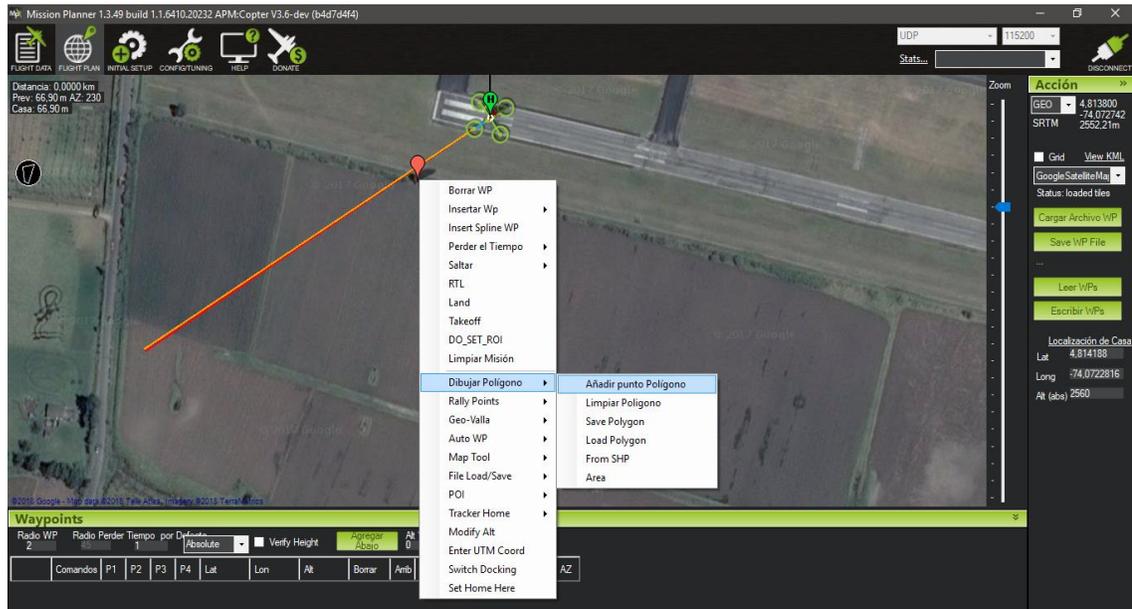
Una de las facilidades del programa MAVProxy es la conectividad que tiene con el Mission Planner, y para ello ejecutamos primero el programa normalmente y donde se establece la conexión de los puertos UDP. El Misión Planner detecta donde envía la información MAVProxy y establece la conexión.

Figura 48 Conexión con MAVProxy



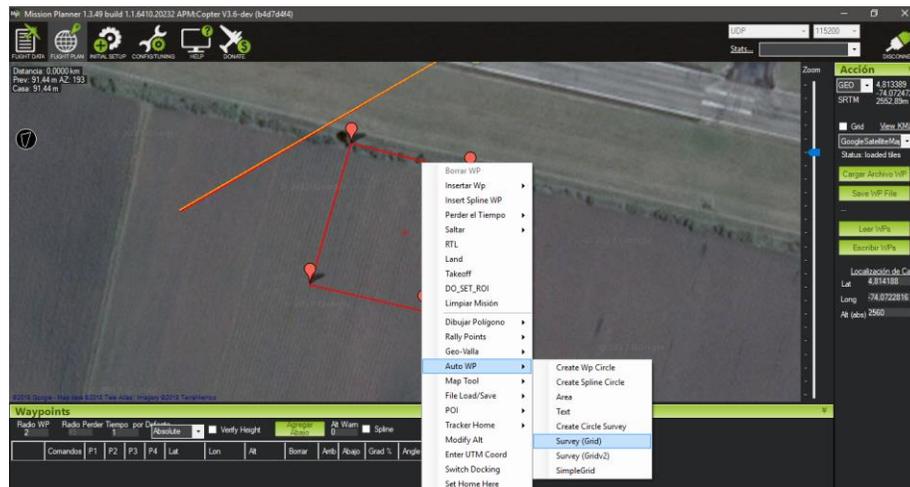
Después de realizar este proceso, se podrá observar el dron en la ubicación requerida, lo que se debe realizar es la selección del área donde se conoce hay presencia de minas antipersonales, y para ello nos trasladamos a la opción, plan de vuelo, después seleccionamos las opciones con el cursor derecho y seleccionamos dibujar polígono e añadimos un punto de polígono.

Figura 49 Punto de Polígono Mission Planner



Realizamos el dibujo del polígono y establecemos el área que vamos a realizar la búsqueda. Para nuestro ejercicio el área es de 1.590 m² en la cual realizaremos un enmallado para la búsqueda de minas, seleccionando la opción auto waypoints.

Figura 50 Selección del enmallado



Posterior a este procedimiento se establece el enmallado, estableciendo la distancia entre cada línea la cual será de 1 metro de distancia entre cada línea, a una velocidad de 1 m/s de acuerdo a las recomendaciones dadas por el fabricante del detector. De igual forma teniendo esta información tenemos que el proceso de vuelo demorara unos 32 a 34 minutos para este recorrido. Con estos datos se realiza la planeación de vuelo del multicoptero, configurando el Misión Planner para la misión. Para ello se requiere que se encuentre el dron en modo GUIDED, se seleccione la configuración de MISSION STAR, seleccionamos CONFIGURAR EL MODO, luego el botón ARM, y por último seleccionamos la opción HACER ACCIÓN.

Figura 51 Establecimiento del enmallado con la velocidad.

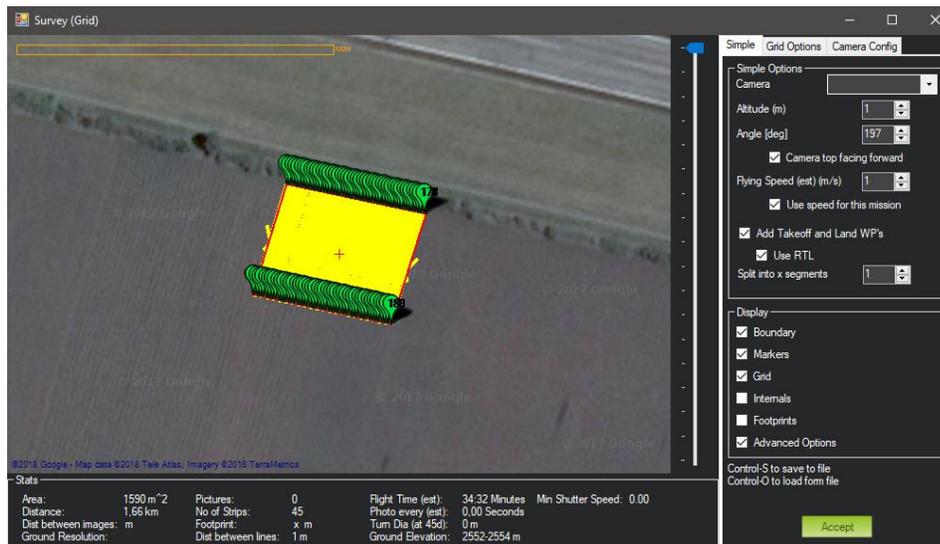


Figura 52 establecimiento del plan de vuelo

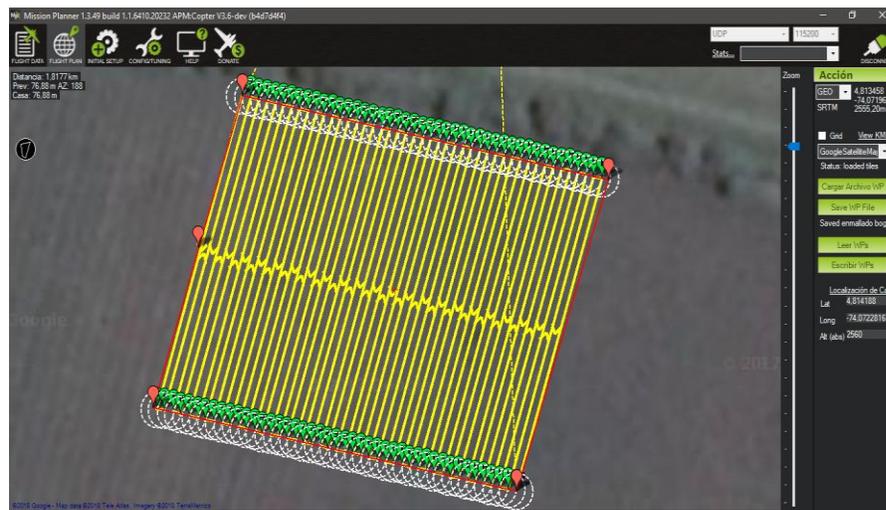


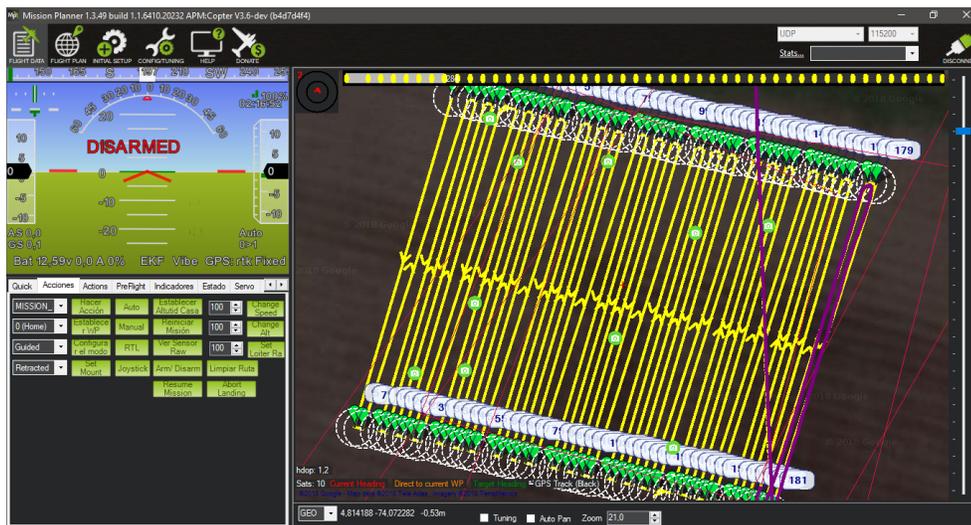
Figura 53 configuración para la misión



Después de realizar estos pasos, nuestro dron iniciara el proceso de vuelo, ascendiendo a 30 m para después ir descendiendo paulatinamente hasta llegar a la misión la cual se estableció que la altura máxima del suelo debe ser de 1 m/s.

Para la simulación de la detección de minas se utilizó la opción TIGGER CAMERA NOW, donde nos dejara registrado en la simulación la detección de alguna mina antipersonal. Para la configuración del detector, este envía una señal a una computadora la cual está realizando una verificación de la misión y su recorrido y esta señal convertida en un dato ubicable en tiempo real dentro de un mapa, nos dará ubicaciones de las minas en esa área. Una vez finalice el dron de realiza el procedimiento de búsqueda, regresa inicialmente a HOME, donde automáticamente aterrice y apaga sus motores

Figura 54 Finalización de misión búsqueda de minas



Efectuada la misión pasamos a la ejecución del programa diseñado para este proyecto el cual es un buscador de los puntos donde se detectaron minas antipersonales dejados en la pantalla y el drone ira directamente a buscar cada uno con el fin de ellos.

Para realizar el siguiente paso se debe seccionar el archivo de telemetría que emite el mision planner y con el archivo de telemetría vamos a crear un archivo CSV, el cual es necesario para la ejecución del programa Python, después de generar este archivo vamos a su ubicación y lo trasladaremos donde se encuentra el programa con el archivo inicial de la misión.

El programa busca el archivo CSV y el archivo de la misión inicial y crea un nuevo archivo INFO.WAYPOINTS donde solo encontraremos los puntos donde se encuentran las minas para su correspondiente destrucción este archivo es cargado nuevamente en la plataforma de mision planner y ejecuta la misión.

De igual manera el programa se encuentra configurado para dejar una mina que será controlada a control remoto en cada WAYPOINT seleccionado por el programa. Durante la simulación, esta se muestra como una cámara la cual se deja en cada mina encontrada, donde el drone realizar un retardo de su vuelo y deja el artefacto para luego continuar con este proceso. La altura predeterminada para colocar cada objeto es de 2 metros sobre el terreno. Es indispensable aclarar que durante este proceso se debe tener una distancia prudente para este proceso, debido a que puede haber una explosión de alguno de los explosivos que se colocaron dentro del drone o la activación de alguna de las cargas al caer.

En el anexo se podrá observar mayor información sobre el código del programa y su funcionamiento.

Figura 55 Código fuente para la búsqueda de minas.

```

import csv
import sys
import string
import numpy as np
palabra='mavlink_camera_feedback_t'
ocurrencias=[]
a=[]

def extract(name):
    with open(name,"r") as lineas:
        for linea in lineas:
            if palabra in linea:
                lineas=linea.split(',')
                for i, j in enumerate(lineas):
                    if j=="alt_pel":
                        ocurrencias.append("1"+'\t'+0+'\t'+0+'\t'+0+'\t'+16+'\t'+1.000000+'\t'+0.000000+'\t'+0.000000+'\t'+0.000000+'\t'+add_point(lineas[13]) +
                        "1"+'\t'+0+'\t'+0+'\t'+0+'\t'+203+'\t'+1.000000+'\t'+0.000000+'\t'+0.000000+'\t'+0.000000+'\t'+1.000000+'\t'+0.000
                        "1"+'\t'+0+'\t'+0+'\t'+0+'\t'+203+'\t'+1.000000+'\t'+0.000000+'\t'+0.000000+'\t'+0.000000+'\t'+0.000000+'\t'+0.000

def extract_2():
    archivo = open('bogota.waypoints',"r")
    linea1 = archivo.readline()
    linea2=archivo.readline()
    linea3=archivo.readline()
    a.append(linea1+linea2+linea3[:-1])
    write_data(a+ocurrencias)

def add_points(data):
    return data[0:-7] + '.' + data[-7:]

def write_data(data = ''):
    path = './info.waypoints'
    f = open(path, "w")
    np.savetxt(f, data, fmt="%s")

name = "archivo.csv"
extract(name)
extract_2()

```

Figura 56 misión para la destrucción de las minas.



Después de este proceso el drone vuela a su punto inicial donde se selecciona otra área para la búsqueda e inicia su ciclo nuevamente. La agilidad para realizar la carga depende mucho de las condiciones climáticas que pueden presentarse durante el proceso de búsqueda. De igual manera el software permite una mayor movilidad y maniobrabilidad para efectuar los diferentes tipos de misión propuestos.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el desarrollo de nuestra aeronave no tripulada con detector de metales para la búsqueda de minas antipersonales, permite optimizar tiempo y costos.

Este proyecto logra identificar que el sistema más óptimo para la detección de minas antipersonales es el detector de metales de inducción por pulsos, teniendo en cuenta que este método proporciona un alcance mayor analizando el campo minado disminuyendo el error.

Teniendo en cuenta los parámetros aerodinámicos, al integrar el detector de metales con el dron, se demostró por medio de los cálculos que este dispositivo soporta perfectamente el peso sin afectar sus condiciones de vuelo.

De acuerdo a los cálculos efectuados se obtuvo una autonomía de 16 minutos con una batería de 10.000 mAh

Al realizar las configuraciones iniciales del vuelo con el software MISION PLANNER, se establece un ascenso de 30 m para llegar a la zona minada donde el dron pasara por todos los obstáculos que se presenten hasta llegar a 1 m al nivel del suelo iniciando la misión configurada. Para hacer el barrido a la zona se establece una velocidad desde 0,5 m/s hasta 1 m/s.

Por otra parte, se comprobó a través de ayudas de plataformas como MISION PLANNER, se muestra como inicialmente se basa el proceso de detección desde el momento que se parametriza la zona de búsqueda y se hace un barrido con el dron de ser el caso de hallar algún objeto sospechoso de metal conocido como mina, él nos muestra las coordenadas exactas para posteriormente volver hacer un barrido más detallado para determinar si es necesario neutralizar la mina.

Estos son cálculos iniciales porque aún no se han incluido variables como velocidad del viento, tipos diferentes de terreno que tengas compuestos metálicos que afecten los resultados, humedad, y cualquiera que no sea aun contemplado dentro de la literatura.

Aún queda el siguiente paso que es la puesta en marcha de la prueba piloto del dispositivo en un campo minado real en Colombia.

Para futuras investigaciones se recomienda ...

Con el fin de optimizar la tecnología se puede instalar sensores que permitan la detección del terreno para lograr una estabilidad de la elevación en terrenos irregulares, así como efectuar mapeo por medio de cámaras RGB e infrarrojo.

6. BIBLIOGRAFIA

GONZÁLEZ, B. Colombia y las Minas Antipersonal-Sembrando Minas Cosechando Muerte. *Bogotá*: Crear & Comunicar, 2000.

PAZ PENAGOS, Hernán. Minas antipersonal en Colombia. 2011.

LAHUERTA, Y. Impactos económicos generados por el uso de Minas Antipersonal en Colombia. Colombia, Departamento Nacional de Planeación, Dirección de Estudios Económicos, Bogotá, 2003. Vol. 235.

LAHUERTA, Yilberto; ALTAMAR, Ivette María. La erradicación de las minas antipersonal sembradas en Colombia, Implicaciones y costos. Dirección de Justicia y Seguridad del DNP, Archivos de Economía, 2002, vol. 178.

ALONSO OLLACARIZQUETA, L. (1995). Enemigos invisibles, campos de muerte. Las minas antipersonales. Seminario de Investigación para la Paz, Centro de Investigación para la Paz.

INTERNATIONAL CAMPAIGN TO BAN LANDMINES. Ficha técnica: El impacto de las minas antipersonales y los remanentes explosivos de guerra sobre los menores de edad. Noviembre del 2014. Enlace: <http://colombiasinminas.org/wp-content/uploads/2014/12/249774308-Ficha-Tecnica-EI-Impacto-de-Las-Minas-Antipersonal-y-Los-Remanentes-Explosivos-de-Guerra-Sobre-Los-Menores-de-Edad.pdf>

DIRECCIÓN PARA LA ACCIÓN INTEGRAL CONTRA MINAS ANTIPERSONALES. [En línea] 30 de marzo de 2019, [revisado en 24 de abril de 2019] disponible en internet: <http://www.accioncontraminas.gov.co/estadisticas/Paginas/victimas-minas-antipersonal.aspx>

DIRECCIÓN PARA LA ACCIÓN INTEGRAL CONTRA MINAS ANTIPERSONALES. [En línea] 30 de marzo de 2019, [revisado en 24 de abril de 2019] disponible en internet: <http://www.accioncontraminas.gov.co/estadisticas/Paginas/victimas-minas-antipersonal.aspx>

LAHUERTA, Y. Impactos económicos generados por el uso de Minas

Antipersonal en Colombia. Colombia, Departamento Nacional de Planeación, Dirección de Estudios Económicos, Bogotá, 2003. Vol. 235.

CUERNO REJADO, Cristina. Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad. Dyna, 2016, vol. 91, no 3, p. 282-288.

EL ESPAÑOL, 4 de noviembre del 2015, drones españoles para detectar las minas de Bosnia [archivo de video], Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=6ks0H-2JJWo>

SERRANO CORDERO, Cristian; PÉREZ CURUTCHET, Omar. Análisis, diseño estructural y construcción de un dron para la detección de minas antipersona. 2016. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica de Catalunya.

7. ANEXOS

Anexo A. Tipo de minas antipersonales

Anexo B Sistemas de Detectores de Metales

Anexo C Víctimas por municipio

Anexo D. Base de datos víctimas de minas en Colombia

Anexo E Tabla de potencia TMC

Anexo F Cálculo Vuelo de avance en las ciudades donde se realizó la priorización

Anexo G Código para la búsqueda de minas antipersonales

Anexo H Análisis Económico